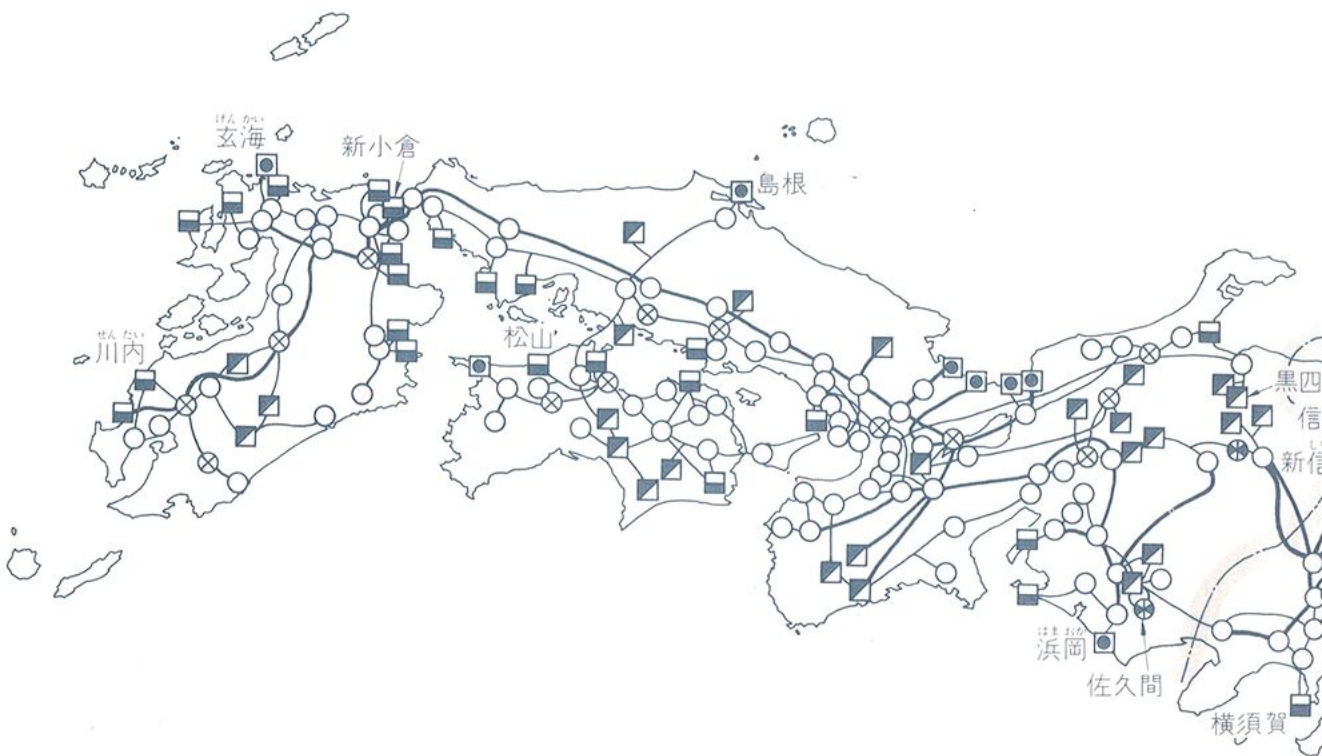
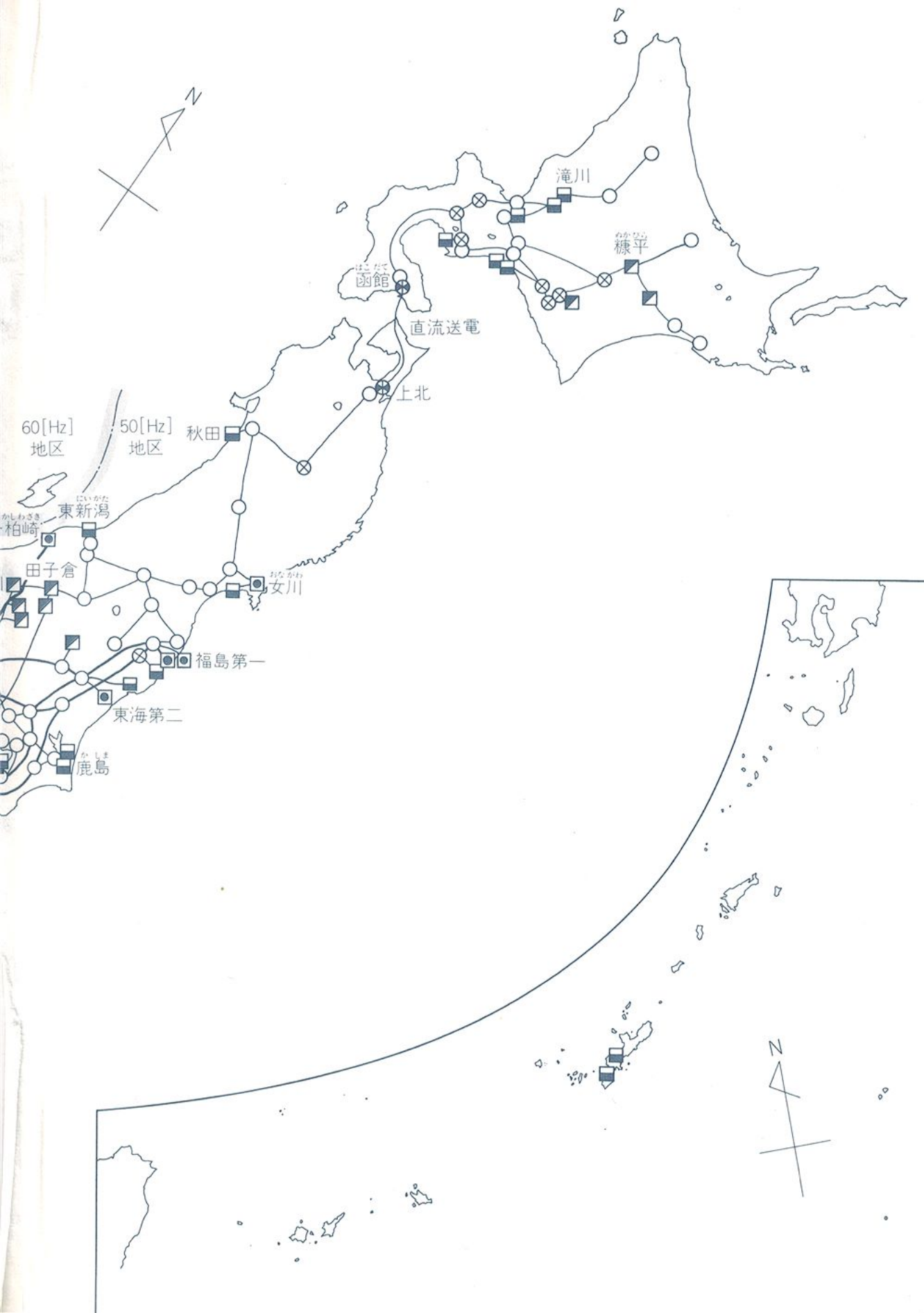
文部省検定済教科書 | 7 実教 | 工業 180

電気技術 I B

改訂版

実教出版

全国送電系統のあらまし

水力発電所
火力発電所
原子力発電所
変　電　所
変　換　所
開　閉　所
送電線 500[kV]
送電線 275～187[kV]

N
滝川
糠平
函館
直流送電
上北
60[Hz]
地区
50[Hz]
地区
秋田
東新潟
柏崎
田子倉
女川
福島第一
東海第二
鹿島
N

平成元年３月31日　文部省検定済　高等学校工業科用

電気技術ⅠB
改訂版

宮入庄太
林　　泉

実教出版株式会社

監　修

東京工業大学名誉教授 東京電機大学教授 工学博士	宮入庄太
東京工業大学名誉教授 電気通信大学教授 工学博士	林　　泉

編　修

元東京都立本所 工業高等学校長	緒方興助
東京都立本所 工業高等学校教頭	新井芳明
元東京工業大学助教授 工学博士	海老塚佳衛
元東京都立練馬 工業高等学校教諭	鬼塚新一
東京都立町田 工業高等学校教諭	熊谷文宏
元東京都立杉並 工業高等学校教頭	久米健一
東京都立小石川 工業高等学校教諭	菅谷光雄
東京都立八王子 工業高等学校教諭	高野雄三郎
東京都立小金井 工業高等学校教諭	高橋日吉
東京工業大学助教授 工学博士	高橋亮一
東京都立北豊島 工業高等学校教諭	柄本治利
元東京工業大学付属 工業高等学校副校長	馬場秀三郎
東京都立町田 工業高等学校教諭	平井喜之
元東京工業大学付属 工業高等学校教諭	藤縄英作

協　力

神戸市立御影 工業高等学校教諭	石井祺彬
兵庫県立兵庫 工業高等学校教諭	稲田　始
東京都立練馬 工業高等学校教諭	多田正美
愛知県立名南 工業高等学校教諭	船橋岩夫
東京都立小金井 工業高等学校教諭	保坂尚光
元兵庫県立兵庫 工業高等学校長	渡辺次郎

目　次

第8章　発　　電

第9章 送　　電

第10章　配　電

第11章　屋内配線

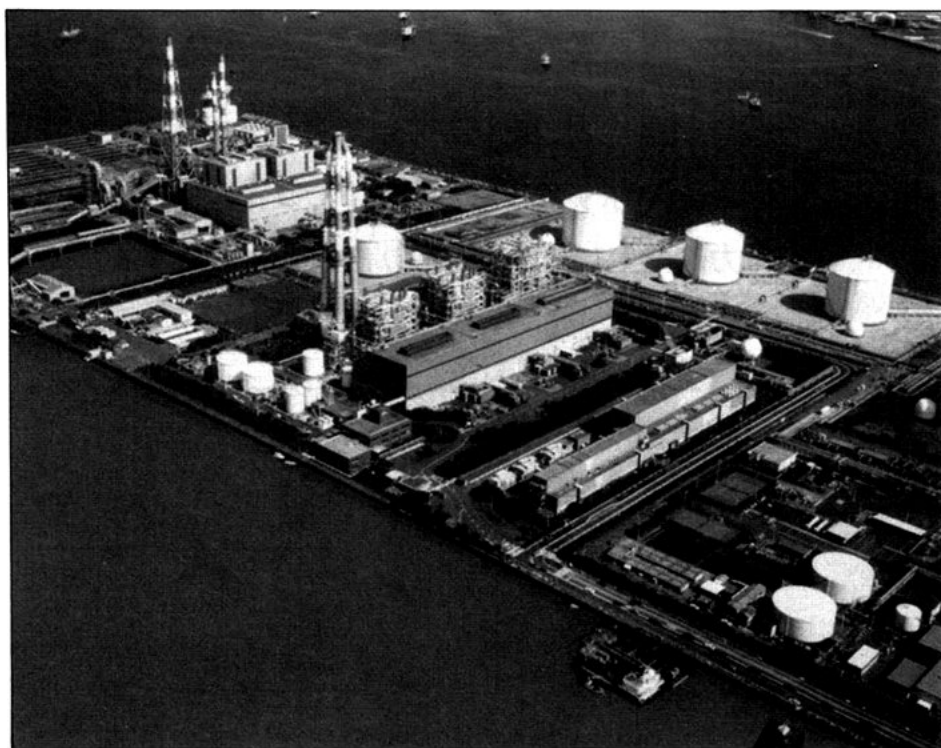
第12章　電気関係法規

「電気技術ＩＡ」目次

第8章

発　電

電気エネルギーは，生活や生産に必要な熱・光・機械エネルギーなどのエネルギーに容易に変えることができるので，便利に使用されており，その使用量は，年々増加してきている。

この章では，大きな電気エネルギーを発生させる発電の方法や，いろいろな発電のための施設・設備について学ぶとともに，運用についても理解する。

火力発電所

1　発電方式

この節の目標　発電すなわち電気エネルギーを発生させるということは，無から有を生み出すということではなく，他のエネルギーを電気エネルギーに変換することである。ここで，電気エネルギーのもとになるエネルギーを供給してくれるものは，エネルギー資源といわれる。

一般に，発電の方法にはいろいろあるが，大きな電力量を発生させるためには，膨大なエネルギー資源が必要であり，それが大量に，経済的に安定して入手できなくてはならない。

ここでは，いろいろな発電方式について調べ，我が国の電力事情と，その供給設備について学習する。

1. 発電方式

(1) 発　　電

図1(a)に示すように，磁界中でコイルを回転すると，コイルには起電力が発生し，電気を取り出すことができる。コイルを回転して

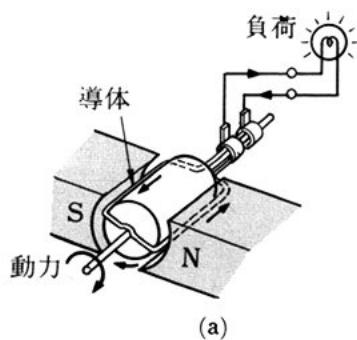
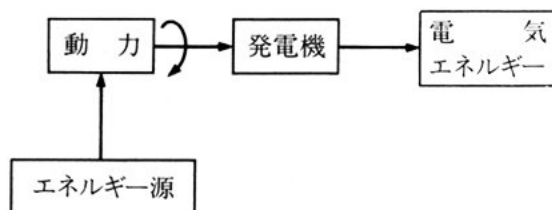



図1　発電のしくみ

電気を取り出そうとすると，コイルは磁界から大きな抵抗力を受ける。そのため，外部から抵抗力に打ち勝ってコイルを回転し続けるだけのエネルギーを供給しなければならない。発電機は，外部から供給する機械エネルギーを電気エネルギーに変換して，負荷に供給しているのである。

このように，外部から供給するエネルギーを電気エネルギーに変換することを**発電**（power generation）といい，大電力を発生させるには，多量のエネルギーが必要である。

（2） 発　電　方　式

電気エネルギーを作り出すために外部から供給するエネルギー資源としては，1）水力・風力・地熱・潮力・波力・太陽光，2）石炭・石油・天然ガス，3）ウラン・トリウムのような核燃料，などの利用が考えられる。

水力発電　図2(a)に示すように，水力を利用して，水車を動力装置（原動機）とする発電を**水力発電**（water power generation）という。

我が国は，山岳地帯が多く，豊富な降水量があって，水力資源に恵まれている。我が国の発電に利用できる水力は，最大出力で46.7×10^6 [kW] といわれ，35.7×10^6 [kW] がすでに開発されている。

火力発電　図2(b)は，蒸気を利用して発電する場合を示す。石油・石炭・天然ガスなどの燃料を燃焼して，ボイラ内で高温・高圧の蒸気を発生させ，その蒸気を蒸気タービンとよばれるものに供給して，発電機を回す。このような蒸気のもつエネルギーを**汽力**といい，汽力を利用する発電を**汽力発電**（steam power generation）という。

(a)　水力発電

(b)　火力発電

(c)　原子力発電

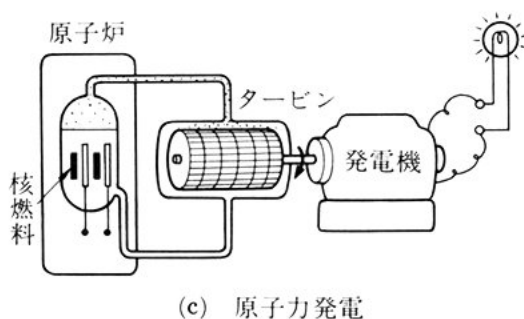
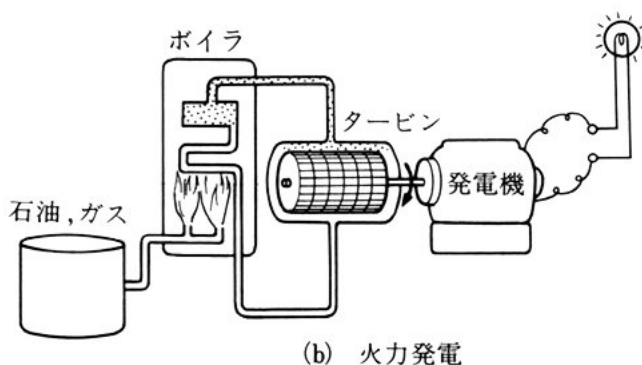
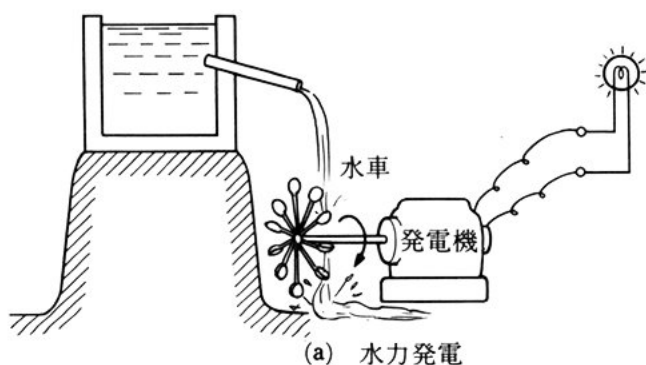



図 2　いろいろな動力装置による発電

ここで，燃料の燃焼による熱エネルギーを**火力**といい，火力をエネルギー源とする発電を**火力発電**（thermal power generation）という。我が国における火力発電の大部分は汽力発電であるため，汽力発電を火力発電ということが多い。

火力発電は，水力発電に比べ，大容量の発電所を，短期間にしかも電力需要の多い大都市の近くに建設できるため，燃料費が必要で　5

あるにもかかわらず，より多く利用されるようになった。

燃料の燃焼を機関内部で行い，その火力を直接機械エネルギーに変換する内燃機関（ディーゼル機関・ガソリン機関・ガス機関）を用いる発電を**内燃力発電**という。内燃力発電は，汽力発電に比べ，装置が簡単で，効率もよく，始動・停止も容易であるが，大容量の発電には適さない。

原子力発電　あと（第4節）で学ぶように，ウランの原子核は，中性子を吸収すると核分裂する。この核分裂が連続的に起こると*，多量のエネルギーが放出される。この原子エネルギーを**原子力**という。図2(c)に示すように，原子炉内で原子力を熱にして水に与えると，蒸気が得られる。この蒸気を蒸気タービンに供給すると，汽力発電によって電気エネルギーが得られる。このように，原子力をエネルギー源とする発電を**原子力発電**（nuclear power generation）という。原子力発電は，エネルギー資源の多様化のためにも，今後の開発が大きく期待される。

その他の発電　地熱によってできた天然蒸気を利用する**地熱発電**，潮の干満による潮位の変動をエネルギー源として利用する**潮力発電**などがある。

なお，原動機や発電機のような回転機を用いないで，熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する方式を**直接発電**という。直接発電としては，図3に示すように高温の導電性ガスを，高速度で磁界中に通過させると電極間に電磁誘導作用で直流電力を発生する**MHD** 発電**，燃料（水素）と酸化剤（酸素）の化学反応によって，連続的に直流電力を発生する**燃料電池**などがある。

---

* 連鎖反応という。詳しくは 63，64 ページで学ぶ。

** MHD（magnetohydrodynamics；電磁流体力学）

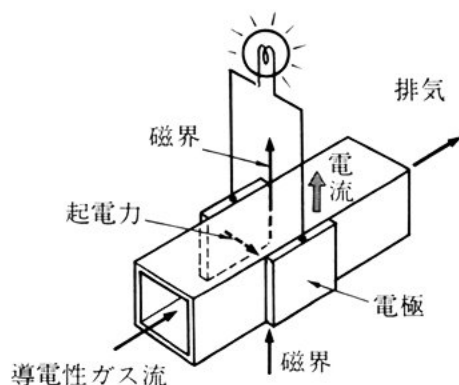



図 3　MHD 発電の原理図

2.　電力の需要と供給

（1）　需　要　と　供　給

電気を利用する側の立場から消費に必要とする電力を **需要電力**，需要にこたえるための電力会社が供給する電力を **供給電力** という。需要は，文化や経済の情勢，産業構造の変化の動向を反映して，年年変化し，また季節や時間帯などによっても異なる。このような需要に対し，蓄えることのできない電力を適正かつ合理的に供給しなければならない。

（2）　電　力　の　需　要

9電力会社の供給電力量を用途別にみると，61年度は電灯需要が26［%］，電力需要として業務用が16［%］，小口電力が17［%］，大口電力が38［%］，その他が3［%］という比率になっている。この比率は固定的なものではなく，産業設備投資の増減，経済成長の変動，消費者の動向などによって左右される。

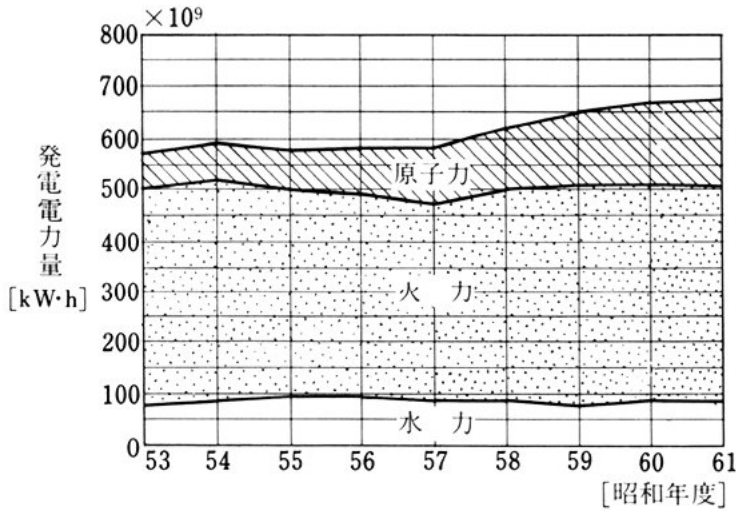
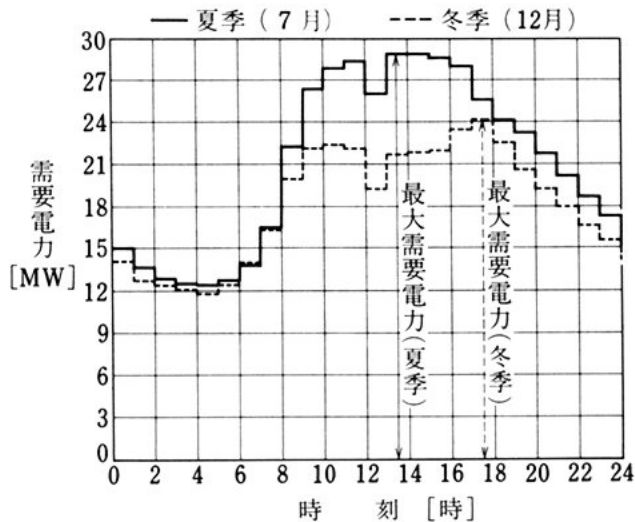
図4は，全国の年間発電電力量，すなわち総需要量の移り変わりを示したもので，年々増加の傾向にある。

(電気事業連合会統計委員会編「電気事業便覧」昭和62年版による)

図 4　我が国の年間発電電力量の推移

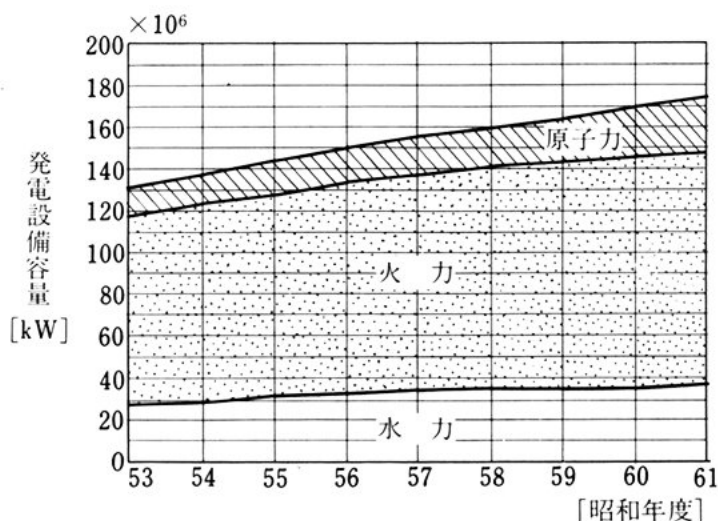
図5は，ある地域における夏季および冬季の1日間の電力の需要状態を1時間ごとの変化で示したグラフであり，このような曲線を**日負荷曲線**という。日負荷曲線で，需要電力の最大の部分を**最大需要電力**（maximum demand）または**ピーク負荷**（peak load）といい，1年を通じての最大値を**年間最大需要電力**という。

図 5　日 負 荷 曲 線

(3)　電力の供給

電力は常時これを蓄えておくことができないから，消費する分だけ発電し，供給する必要がある。したがって，発電設備は，最大需要電力を供給できるものでなければならない。さらにいくらかの予備設備も必要である。

図6は，発電設備容量，すなわち設備の発電最大電力の推移を示したものである。今後も増大するであろう最大需要に対応できる設備を保持する必要があり，エネルギー資源の利用などを考慮に入れて新たな電源開発が進められている。

図6から，水力発電・火力発電・原子力発電による最大電力の割合，また図4から，それぞれの発電電力量の割合もわかるようにしてある。

図6　我が国の発電設備容量の推移

(電気事業連合会統計委員会編「電気事業便覧」昭和62年版による)

問　題

1. 発電とはどのようなことか。

2. 利用するエネルギーの種類によって，発電方式を列挙せよ。

3. 図5で，最大需要電力は夏季と冬季でどちらが大きいか。年間最大需要電力はいくらか。また，最大需要電力が発生する時刻は何時ごろか。

4. 家庭や学校における日負荷曲線は，どのようになるか考えてみよ。

5. 我が国の水力・火力・原子力の発電量の割合を調べ，今後の発電設備がどのように推移していくか考えよ。

2 水力発電

この節の目標　水力発電は，水のもつエネルギーを電気エネルギーに変換するもので，そのためには，水のもつエネルギー(水力)を有効に利用できるようにすることや，水力を効率よく電力に変換することが工夫される。

それで，水力発電においては，水のもつエネルギーについてよく研究し，ダム・水路などの水力施設が工夫され，それによって発電するための発電施設が用いられる。ここでは，このような施設・設備について調べる。

1. 理論出力

(1) 流水のもつエネルギー

流水は，位置エネルギー，運動エネルギーのほかに圧力によるエネルギーをもっている。

位置エネルギー　図1(a)に示すように，基準面より h [m] の高さのところにある質量 m [kg] の物体は，重力の加速度を g(=9.8 [m/s^2]) とすれば，基準面まで下降する間に mgh [J] の仕事をすることができるので，mgh [J] の**位置エネルギー** (potential energy) をもっているという。

運動エネルギー　図(b)に示すように，速さ v [m/s] で運動している質量 m [kg] の物体は，静止するまでに $\frac{1}{2}mv^2$ [J] の仕事をすることができるので，$\frac{1}{2}mv^2$ [J] の**運動エネルギー** (kinetic energy) をもっているという。

(a)　(b)　(c)

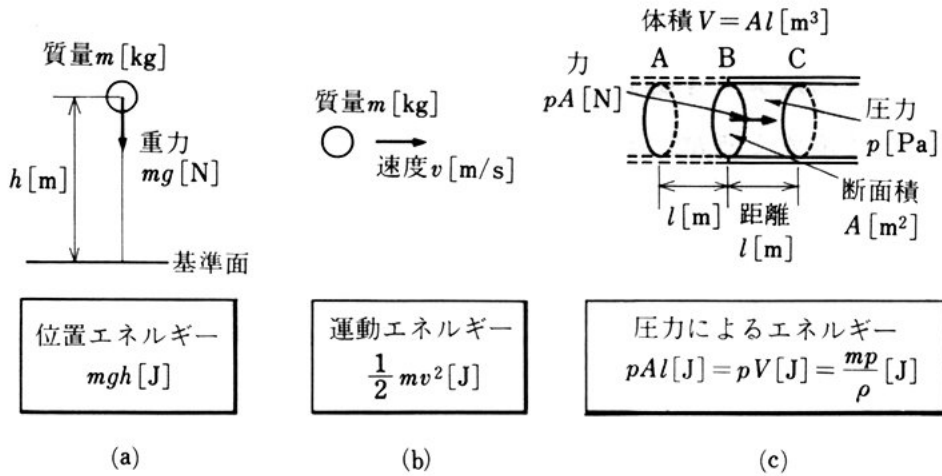



図 1　流水のもつエネルギー

圧力によるエネルギー　流れている水についてエネルギーを考えるときには，以上のほかに，圧力によるエネルギーを考えなければならない。

体積 V [m³] の水が圧力 p [Pa]* の管内に流れ込むためには，圧力に逆らって仕事をする必要がある。この仕事の大きさは，図(c)から，pV [J] であり，圧力 p [Pa] の水 V [m³] は，pV [J] のエネルギーをもっていると考える。これが**圧力によるエネルギー**である。

物体の体積を V [m³], 密度を ρ [kg/m³] とすると，質量 m [kg] は $m=\rho V$ となる。したがって，圧力によるエネルギーを体積では

---

*　面積 1 [m²] 当たりに 1 [N] の力が働くときの圧力を 1 **パスカル** [Pa] という。

$$1\,[\mathrm{Pa}]=1\,[\mathrm{N/m^2}]$$

力の単位に**重量キログラム** [kgf] という単位も使われる。1 [kgf] は，質量 1 [kg] の物体に働く重力の大きさである。

$$1\,[\mathrm{kgf}]=9.80665\,[\mathrm{N}]\ (定義)$$

なお，本書では，1 [kgf] =9.8 [N] として扱う。

また，圧力の単位に 1 [kgf/m²] も使われる。1 [kgf/m²] は，1 [m²] 当たりに 1 [kgf] の力が働くときの圧力である。

$$1\,[\mathrm{kgf/m^2}]=9.8\,[\mathrm{N/m^2}]=9.8\,[\mathrm{Pa}]$$

なく，質量を使って表せば，$\dfrac{mp}{\rho}$ [J] となる。

（2） ベルヌーイの定理

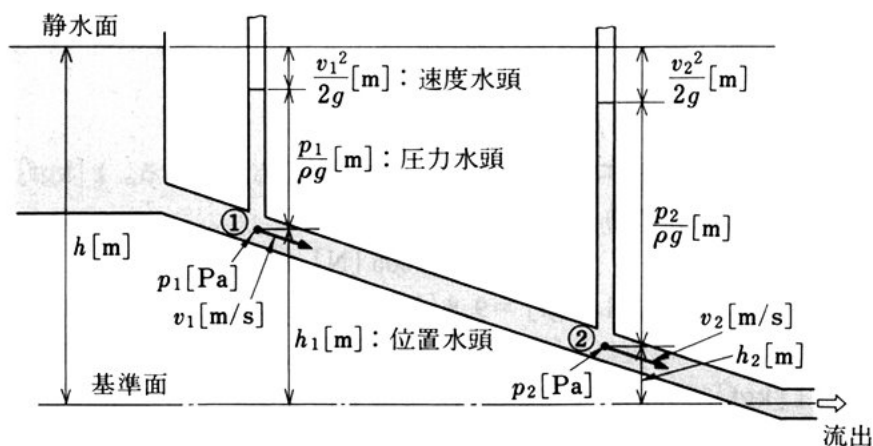
図2に示すように，水が流れている水管がある。基準面より高さ h_1，h_2 [m] の各点①，②における圧力を，それぞれ p_1，p_2 [Pa] とし，流速をそれぞれ v_1，v_2 [m/s] とすれば，点①，②において m [kg] の流水がもっているエネルギー U_1，U_2 [J] は，次のように表される。

$$U_1 = mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1{}^2 + \frac{mp_1}{\rho} \qquad (1)$$

$$U_2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2{}^2 + \frac{mp_2}{\rho} \qquad (2)$$

水管を流れる水は，外部に対して仕事をしていないから，そのエネルギーは等しく，$U_1 = U_2$ である。これを**ベルヌーイの定理**（Bernoulli's Theorem）という。ベルヌーイの定理は，両辺を mg [N] で割って，次のように表して利用することが多い。

$$h_1 + \frac{v_1{}^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2{}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \quad \text{[m]} \qquad (3)$$

図2 ベルヌーイの定理

g は重力の加速度で 9.8 [m/s²]*，ρ は水の密度で 1000 [kg/m³] であるから，これらの値を代入して，次のように表してもよい。

$$h_1+\frac{v_1^2}{2\times9.8}+\frac{p_1}{1000\times9.8}=h_2+\frac{v_2^2}{2\times9.8}+\frac{p_2}{1000\times9.8} \qquad (4)$$

式（3）（（4）も同じ）の両辺とも，第1項は位置エネルギーを，第2項は運動エネルギーを，第3項は圧力によるエネルギーをそれぞれ重力 mg [N] で割ったもので，**水頭**とよばれ，それぞれ，①，②における，h_1 [m]，h_2 [m] を**位置水頭**，$\frac{v_1^2}{2g}$ [m]，$\frac{v_2^2}{2g}$ [m] を**速度水頭**，$\frac{p_1}{\rho g}$ [m]，$\frac{p_2}{\rho g}$ [m] を**圧力水頭**という。水を重力に逆らって，それぞれの水頭だけを持ち上げるときの仕事が，それぞれのエネルギーに相当する。これらの水頭は，いずれも長さの単位で表される。

例題 1．図2において，$h=50$ [m]，$h_1=30$ [m]，$v_1=5$ [m/s] としたとき，点①における速度水頭，圧力水頭，および水圧を求めよ。

解答　点①における速度水頭は，

$$\frac{v_1^2}{2g}=\frac{5^2}{2\times9.8}=1.28\ [\mathrm{m}]$$

ベルヌーイの定理から，

$$50=30+1.28+\frac{p_1}{\rho g}$$

となるから，圧力水頭は，

$$\frac{p_1}{\rho g}=50-30-1.28=18.7\ [\mathrm{m}]$$

水圧 p_1 は，

* 重力加速度 g [m/s²] の値は場所や高さによって変わる。我が国の重力加速度の実測値はおよそ 9.7901～9.8068 [m/s²] である。したがって，この教科書では近似値として $g=9.8$ [m/s²] を用いる。

$$p_1 = 18.7 \times \rho g = 18.7 \times 1000 \times 9.8$$
$$= 183 \times 10^3 \text{ [Pa]} = 183 \text{ [kPa]}$$

（3）理 論 水 力

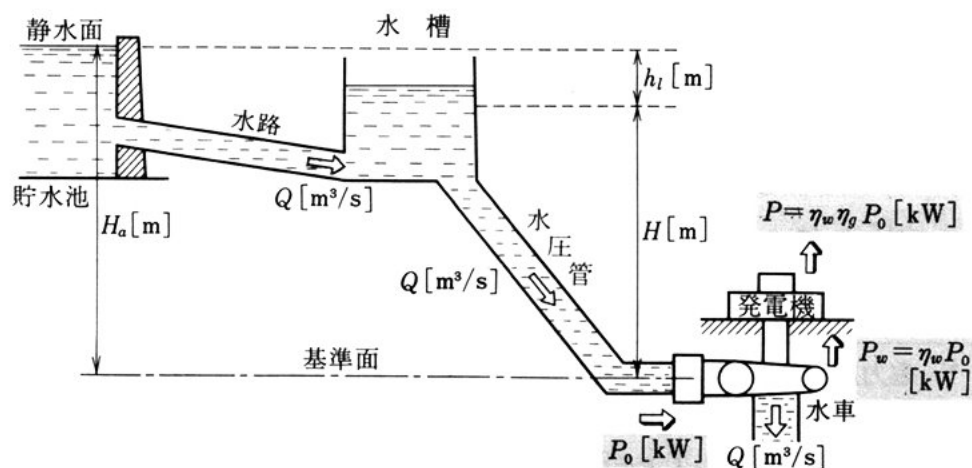
図3で，水車の位置を基準面とすれば，基準面から貯水池の静水面までの高さ H_a [m] に相当する位置エネルギーから，水路や水圧管の壁と水との摩擦などによるエネルギーの損失を引いたものが，基準面における有効な位置エネルギーである。

水頭で表せば，エネルギーの損失に相当する損失水頭を h_l [m] として，基準面に対する有効な位置水頭 H [m] は，次の式で表される。

$$H = H_a - h_l \qquad (5)$$

この H [m] を一般に**有効落差**といい，H_a [m] を**総落差**という。総落差 H_a [m] の高さから水が落下すると，H [m] に相当する位置エネルギーが，水車に動力として供給される。

Q [m^3] の水が水車に流れ込むと，水 1 [m^3] の質量は 1000 [kg] であるから，$mgh = 1000Q \times 9.8 \times H = 9800QH$ [J] のエネルギーが水車に供給される。

図3 理 論 水 力

したがって，水車に流入する水の流量（1秒間当たりの水量）を Q [m³/s] とすれば，水車に供給される動力(1秒間当たりのエネルギー) P_0 [W] は，次のようになる。

$$P_0 = 9800QH \text{ [W]} = 9.8QH \text{ [kW]} \quad (6)$$

5　この P_0 を**理論水力**という。

このように，理論水力は H と Q とによって決定されるので，落差 H をどのようにして確保するか，流量 Q をどのように運用するかが，水力発電では重要な課題である。

この P_0 によって水車は回転し，水車出力 P_w に変換され，これは

10　発電機によって電力 P になる。そこで，水車の効率を η_w，発電機の効率を η_g とすれば，発電機出力 P [kW] は次の式で表される。

$$P = 9.8\eta_w\eta_g QH \quad (7)$$

問 1． 流量 6 [m³/s]，有効落差 80 [m]，水車と発電機の総合効率は 90 [%] である。発電機の出力はいくらか。

15　**問 2．** 速度水頭が 0.8 [m] であるという。水量 5 [m³] の運動エネルギーおよび速度を求めよ。

問 3． 有効落差 30 [m]，出力 2000 [kW] の水車発電機が，全負荷で運転しているとき，1時間当たりの使用水量はいくらか。ただし，水車・発電機の効率は，いずれも 90 [%] とする。

20

2．水路式発電施設

自然の状態にある河川の水をそのまま使用するのでは，利用する落差を大きくすることができない。そこで，図4に示すように，ゆるやかなこう配で水路を作って水を水槽へ導けば，もとの河川の下流との間に大きな落差を作ることができる。

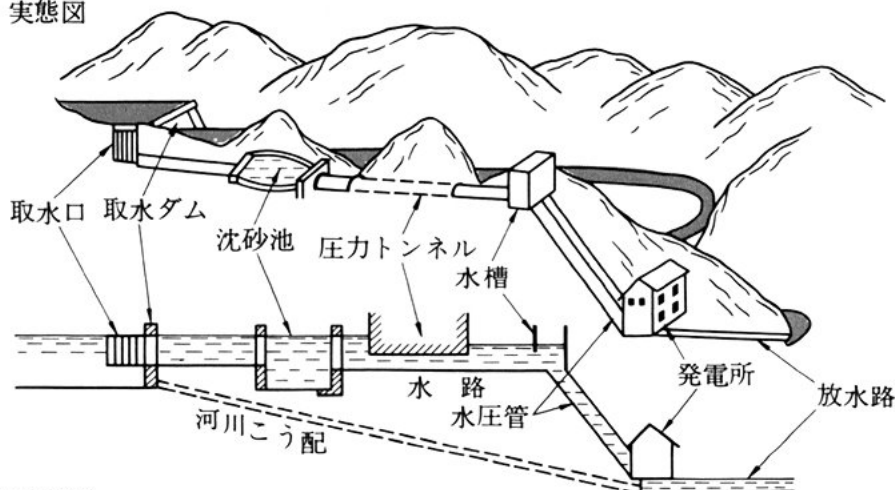



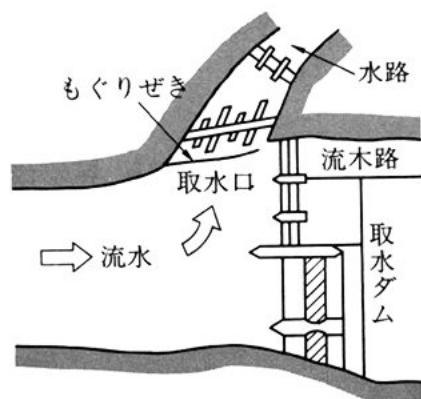
図 4　水路式発電方式

(a) 取水口外観　　(b) 取水口

図 5　取水口付近

このように水路によって大きな落差を作り，それで発電する方式を**水路式発電**という。

(1)　水の取り入れ

河川の水を水路へ取り入れるには，いろいろな施設が必要である。

取水ダム　　水を取り入れるには，いったん水をせき止める。このためのダムを**取水ダム**といい，高さも低く，流水が多いときは，頂上を乗り越えて水が流れる（**越流**する）ものが多い。

取水口　河川の水を水路に導くための入口を**取水口**といい，取水とともに流木・ごみ・土砂などが流入しにくいように，流れに対して，ほぼ直角に作られ，前面にごみよけスクリーン，川底にもぐりぜきが設けられる。

図5は，取水口付近の外観と，その構成略図である。

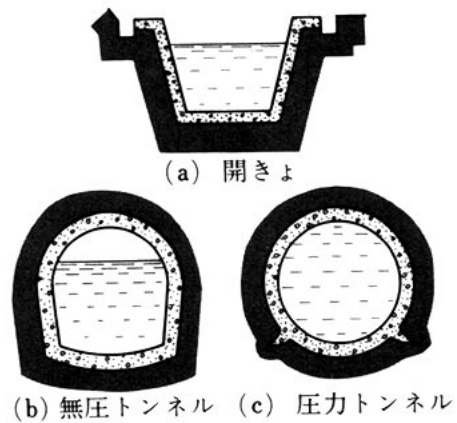
問 4. もぐりぜきは，何のために作られているか。

（2） 水　　路

図4の，取水口から水槽までを**水路**という。水路は開きょやトンネルで構成されている。

開きょ　開きょは図6(a)のように，地盤を掘り，コンクリートで固めて作り，地盤が良好なときは，断面を長方形にする。

(a) 開きょ
(b) 無圧トンネル　(c) 圧力トンネル

図6 水　　路

水を流すには，側壁などとの摩擦抵抗に打ち勝つだけのこう配が必要である。この場合，こう配が大きければ，小さな断面でも大きな流量が得られるが，水路との摩擦損失が大きくなって不経済である。一方，こう配が小さければ流速が小さくなって，土砂の沈殿や藻などが発生するようになる。そこで，開きょのこう配は，$\frac{1}{1000}$～$\frac{1}{1500}$程度に選ばれ，流水の速度は2～3 [m/s] 程度になる。

トンネル　山をう回する開きょで水路が長すぎる場合，トンネルにすれば短くてすみ，土砂や落ち葉の混入もないので，発電用水路として，トンネルがよく用いられる。

トンネルには，図6(b), (c)に示すように，上部に空間を残して水

を流す**無圧トンネル**と，水を充満させて流す**圧力トンネル**とがある。

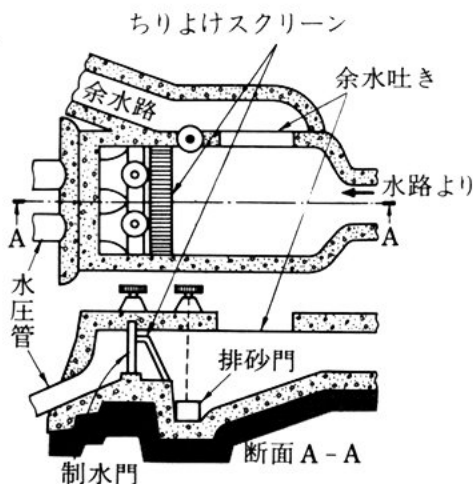
無圧トンネルでの流速は，開きょと同じく，こう配によって決まるが，圧力トンネルでの流速は，こう配に関係なく，水圧差によって決まる。圧力トンネルによる水路は**圧力水路**とよばれる。

沈砂池　水中に含まれている土砂は，水圧管や水車を傷めるので，水路の途中に土砂を沈めるために適当な長さの池が設けられる。この池を**沈砂池**という。沈砂池は，水面の幅と深さを他の水路の部分より大きくし，流速を遅くして，土砂が沈殿しやすくしている。

（3）水　　槽

水槽は，水路と水圧管を接続する部分で，発電機負荷が急に減少したときは，余った水をためたり，放流したりし，負荷が急に増加したときは，その増加分の水量を補給する。水槽の容量は，最大使用水量の2分間程度供給できる大きさにしてある。

図7　水　　槽

水槽には，図7に示すように，**余水吐き**という周囲より低くなったところがある。これは水車の使用流量に対する余分の水を越流させ，河川へ放流するところである。

（4）水　圧　管

じゅうぶんな水圧に耐えられるような水路の管は，円形断面に作られ，**水圧管**（penstock）とよばれる。一般に，水圧管は鋼管で作られている。図8は，その例である。

水圧管内の流速が大きな場合は，内径は小さくしてよいが，摩擦抵抗が大きくなる。一般に，流速は3～5［m/s］が適当とされてい

る。

水圧管の下部は，水圧が高くなるので，上部に比べて，鋼管の厚さを大きくする。高い落差の水圧管では，下部の内径を上部より小さくし（流速が大きくなるから，水圧はその分だけ減少する），厚さがあまり大きくならないようにする。

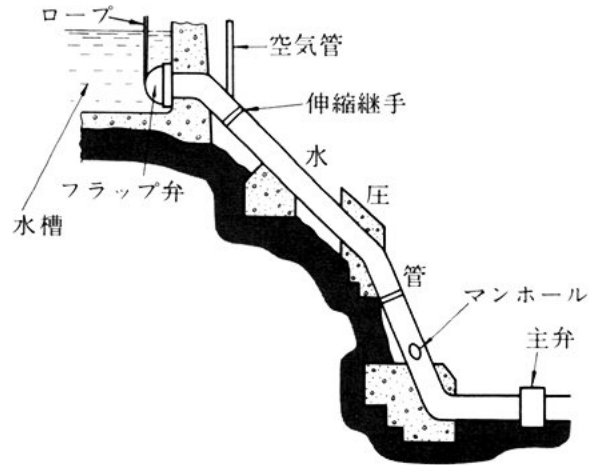



図 8 水　圧　管

図7の制水門，図8のフラップ弁は，水圧管への流入水を止めるもので，その際，管内が真空になるのを防ぐのが**空気管**である。

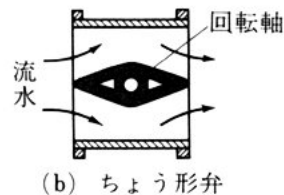
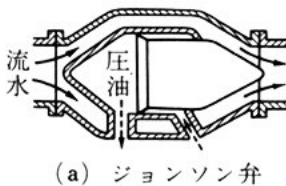
主弁は，水車への流入水を止めるもので，図9に示すジョンソン弁やちょう形弁がよく用いられる。これらの主弁は，全開で通水するか，全閉で通水を止めるかで，半閉のままで使用することはない。

問 5. 水圧管の下部内径を上部より小さくするときの利点を述べよ。

問 6. 水路式発電方式で，水車までの設備を，その順に列記せよ。

図 9 主　弁

(a) ジョンソン弁

(b) ちょう形弁

3. ダム式およびダム水路式発電

(1) ダム式発電施設

河川を横切ってダムを築造し，水をせき止めると，ダムの上流と下流との間に落差が生じる。この落差を利用して発電する方式を**ダム式発電**という。図10は，ダム式発電方式の略図である。

ダム式発電の重要な施設は**ダム**（dam）であって，図11に示すように，岩石を主材料とする**ロックフィルダム**，土壌を主材料とする

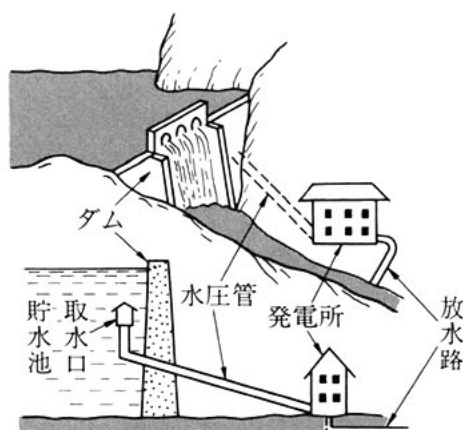



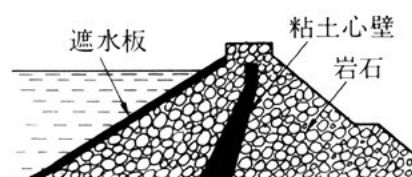
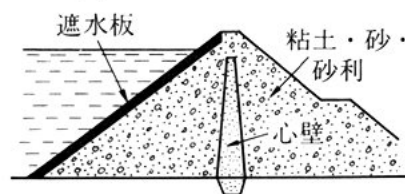
図10　ダム式発電方式

(a) ロックフィルダム

(b) アースダム

図11　ダム

アースダムなどもあるが，一般には，コンクリートを主材料にしたものが多く，主として，重力ダム・アーチダムとして築造される。

重力ダム　図12で，水圧やたい積した土砂などによって働く力F［N］は，ダムを下流に滑らせようとし，またダムを転倒させようとする。

図において，点bを支点と考え

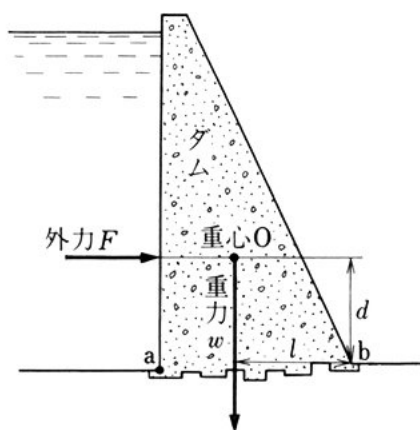



図12　重力ダム

る。水圧や土砂の圧力は，その点を中心としてダムを時計回りに回転（転倒）させようとする。その回転力は Fd [N・m] である。また，ダムの自重によって転倒させまいとする回転力は，wl [N・m] である。

5　ここで，ab をじゅうぶん長くすれば，w [N] と l [m] は増加し，wl は，Fd よりはるかに大きくなり，それだけ，ダムは転倒するおそれがなくなる。

このように，ダムの自重を大きくすることによって，水圧などの外力に耐えられるようにしたダムを**重力ダム**という。

10　**アーチダム**　**アーチダム**は，両岸の幅が狭く，岩盤が丈夫なところに造られ，図13(a)に示すように，その水平断面がアーチ状をしているもので，図(b)は，その垂直断面である。

図(a)に示すように，上流側の面に働く外力は，両岸の岩盤に伝わり，そこで支持される。

15　**問 7.**　重力ダムで，ダムの質量が大きくなるほど，転倒しにくくなることを説明せよ。

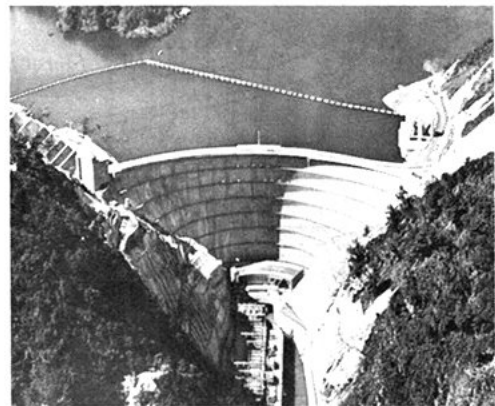
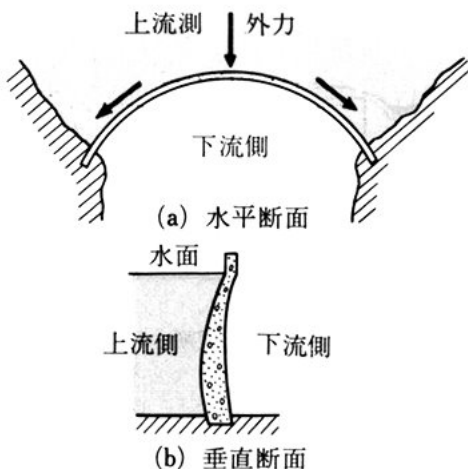
図 13　アーチダム

（2）　ダム水路式発電施設

図14は，ダムによって，上流側と下流側とで落差を作り，取水した水を，こう配のゆるやかな圧力水路で発電所まで導き，もとの河川との間に，さらに落差を加える方式である。ダムと水路を利用するので，**ダム水路式発電**とよばれる。

水撃作用　発電機の負荷が急に減少すると，水車の速度が上昇しすぎるから，水車に流入する水量を少なくする必要がある。

いま，負荷の急減で，水車入口近くの主弁を急に閉じると，水のもつ運動エネルギーのため水圧管内に高い圧力が発生し，この圧力が水圧管の上部へ伝わる。

もし，図14のサージタンクとよばれる水槽がないと，この圧力が圧力水路を通って貯水池に達し，その水面を押し上げる。その結果，その水面下に負の圧力が発生し，水圧管を収縮させる。負の圧力は，圧力水路や水圧管を通って水車入口の主弁に達し，そこで負の圧力波として反射されて，また貯水池の水面に戻り，その水面を押し下げる。その結果，その水面下に正の圧力が発生し，正の圧力波となって主弁に達し，正の圧力波として反射され，水圧管を押し広げる

図14　ダム水路式発電

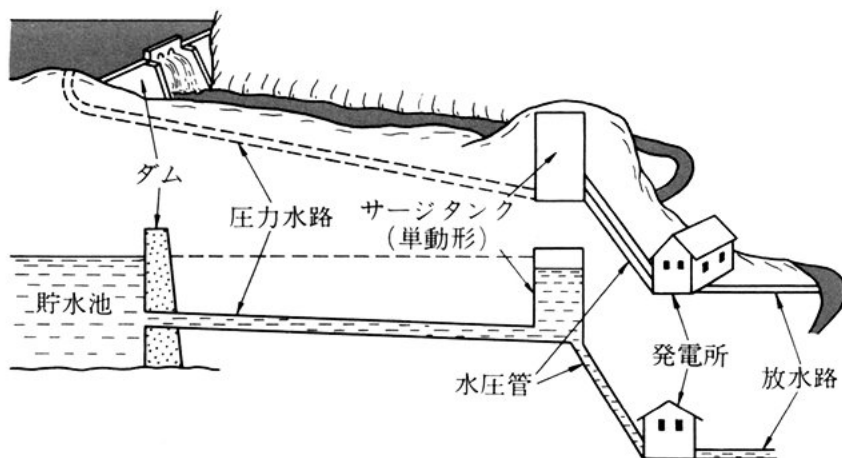
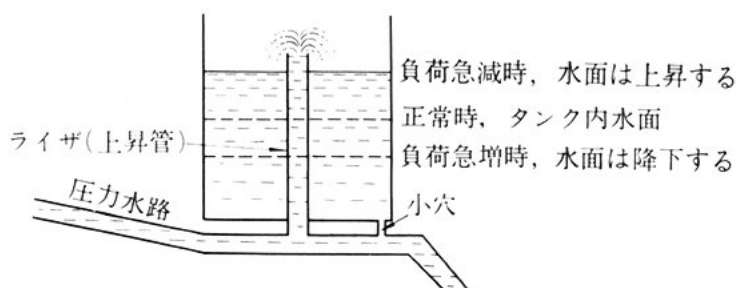



図 15　差動サージタンク

ような力を及ぼす。

このようにして，正負の圧力波が，水圧管を反復伝搬する。これを**水撃作用**（water hammering）という。水撃作用は，異常な圧力の変化を生じるために，ときには水圧管を破裂させることがある。

サージタンク　水圧管は，単に水圧に耐えるだけでなく，水撃作用にも耐えるだけの強さが必要である。

図 14 の発電所近くに，図 15 に示すサージタンクという水槽を設けると，水撃作用は，急激に吸収され，水圧管に異常な圧力変化が生じないようになり，水圧管の破裂を未然に防ぐことができる。また，水槽から上流の長い圧力水路に対する水撃作用の影響も少なくなるので，圧力水路を経済的に作ることができる。このような目的で用いられる水槽を，**サージタンク**（surge tank）という。

図 15 は，差動サージタンクとよばれるもので，主弁の急な開閉による圧力の増（減）のエネルギーを，ライザ内の水面の上昇（下降）によってすばやく吸収し，そのあとで，小穴を通してタンク内の水位がゆっくり上昇（下降）して，余剰水を蓄える（不足水を補給する)。

問 8.　水力発電所で，落差を作る方法を三つ挙げ，それらを簡単に説明せよ。

問 9.　水撃作用を説明し，差動サージタンクの動作を調べよ。

4. 流量と発電

（1） 降　水　量

海水などから蒸発した水蒸気は，雨や雪となってふたたび地上に降下するが，その量を**降水量**といい，mm で表す。

図 16 で，流域面積を S [km^2]，年降水量を R [mm] とすると，その流域における降水による年間全水量は $SR\times10^3$ [m^3] となる。しかし，この全部が点 A から流出するのではなく，一部分が地下水になったり，蒸発したり，樹木に吸収されたりして，その残りが流出するのである。

図 16　河　川　流　域

点 A の 1 年間の流出水量 q [m^3] は，次の式で表される。

$$q=kSR\times10^3 \qquad (8)$$

この式の k を**流出係数**といい，比較的降水量が多い森林地帯の山岳部では，k の値は 0.7 程度である。

問 10. 流域面積 100 [km^2]，年降水量 1800 [mm]，流出係数 0.7 として，年間流出水量および平均流量を求めよ。

（2） 河　川　流　量

河川流量は，流域面積，樹木の多少，平地か山岳地帯かなどによっても異なるが，降水量に影響されることが大きい。

図 17 は，年間における河川流量の変化の一例である。

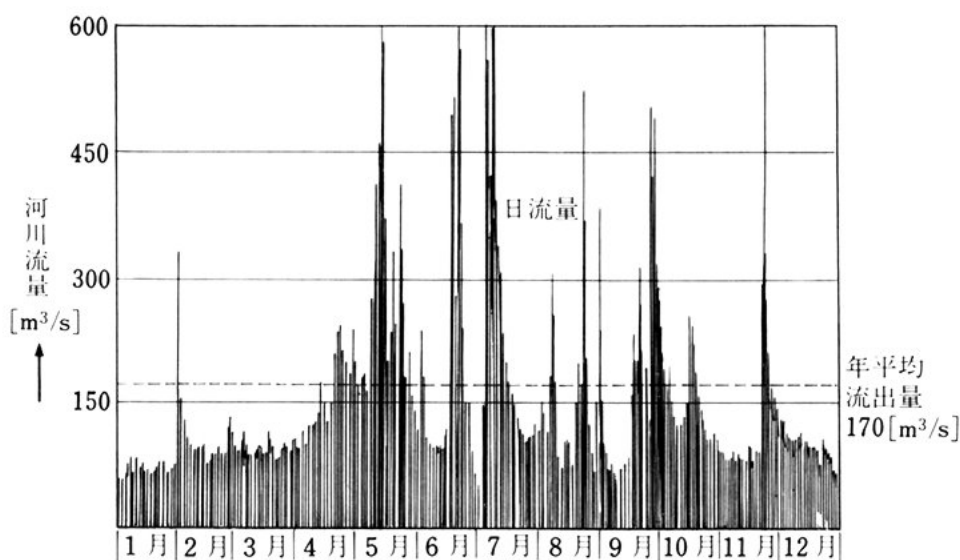
図 17 に示すように，河川の流量は日ごとに変化し，一定していない。雪解け・梅雨・台風の時期は流量が多く，**豊水期**とよばれる。

利根川の年間河川流量の変化(建設省河川局「広域利水調査第2次報告書」による)

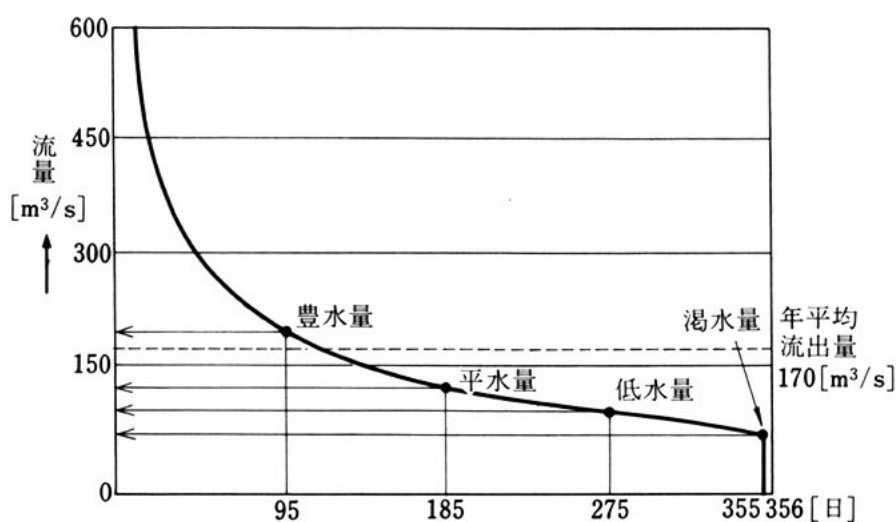
図 17　河川流量の変化

利根川の流況曲線(1970年，栗橋地点)(東京都都市計画局資料より)

図 18　流　況　曲　線

日照りが続く8月や雪解け前の1～3月は流量が少なく，**渇水期**とよばれる。年間を通して1日の流量を大きな順に並べて求められたものは**流況曲線**とよばれ，その例を図18に示す。流況曲線の95日目，

185日目, 275日目, 355日目の流量をそれぞれ**豊水量・平水量・低水量・渇水量**という。これらは取水計画における目安として使われる。例えば，必要な取水量が渇水量ならば，年間355日は取水量が確保できることになる。

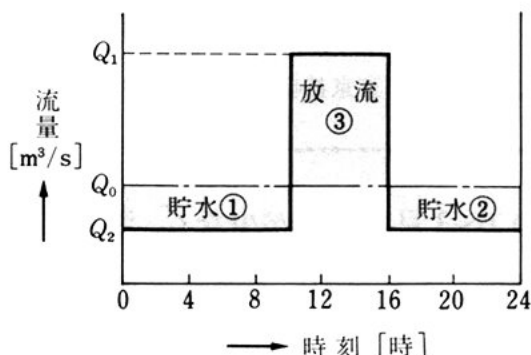
問 11. 図18で，豊水量の値は，およそいくらか。

(3) 流量と発電方式

流込み式発電(ながしこ)　河川の自然の流れをそのまま発電に利用する方式で，渇水期には発電の使用流水量が少なく，豊水期には水を蓄えることができないから，使用流量を超える分がむだになる。この方式を**流込み式発電**という。

調整池式発電　河川の自然流量は，図19に示す Q_0 [m³/s] のように，1日を通じほぼ一定である。一方，電力需要は，昼間は使用電力が大きく，深夜は半減する。

そこで，深夜および軽負荷時に，図19に示すように，河川流量の全部または一部を池に蓄えておき，ピーク負荷時に放流して発電すると，電力需要に都合よく対処でき，河川流量を有効に利用できる。このような池を**調整池**といい，図20に示すように，水路式の水槽の近くに設けられている。この方式を**調整池式発電**という。

図 19 流量調整（ピーク負荷時以外は均等発電）

Q_0：自然流量
Q_1：ピーク負荷時の流量
（発電所の出力が最大）
Q_2：ピーク負荷時以外の流量
③＝①＋②＝調整池容量

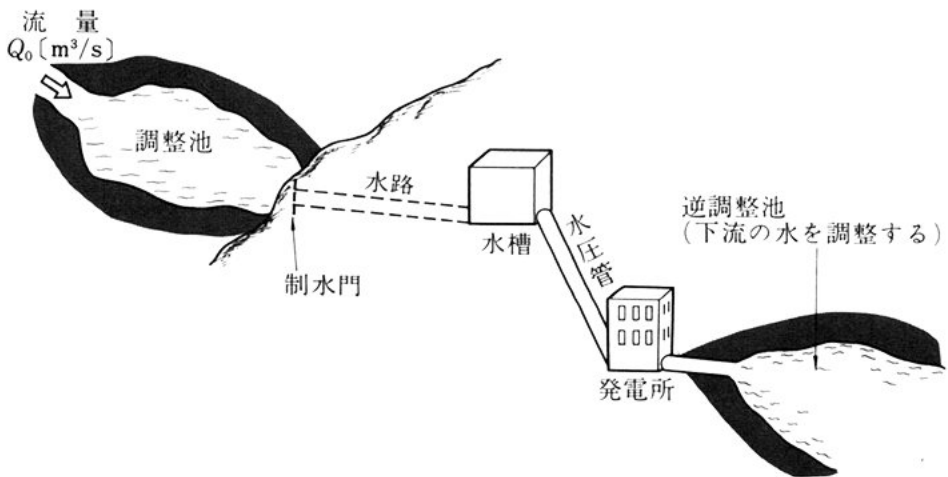



図 20　調　整　池

貯水池式発電　河川流量は，一般的に，夏，冬2回の渇水期がある。一方，電力需要は，夏，冬に需要が多い。そこで，豊水期で，しかも電力需要の比較的少ない時期に余分の水を**貯水池**に蓄えておき，これを渇水期に使用すれば，河川流量を有効に利用できる。この方式を**貯水池式発電**という。

調整池は1日または数日間の流量を調整するが，貯水池は年間の流量を調整するから，容量は大きくなる。一般に，自然の湖やダムを築いてできる人工湖などが用いられる。

図21は，貯水池容量を計画するときに用いられる**積算流量曲線**である。O，A間では，河川流量が使用流量より多いから，貯水池の水は増加する。しかし，A，B間では，河川流量は使用流量より少ないため，貯水池の水を放流しなければならない。点Bからふたたび河川流量の方が使用流量よりも多くなるから，貯水池の水は増加する。したがって，貯水池容量としては，KBに相当する容量があればよいことになる。

揚水発電　図22に示すように，日負荷曲線の基底部分の電力は，主として火力発電・原子力発電・流込み式発電で供給し，ピー

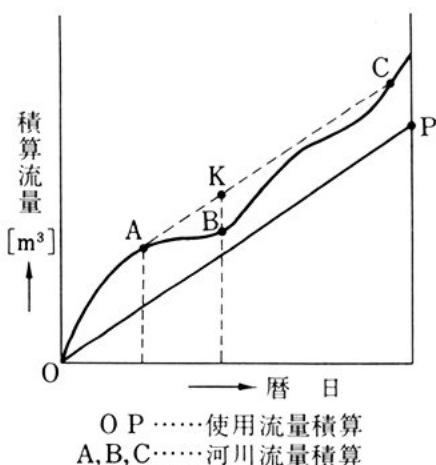
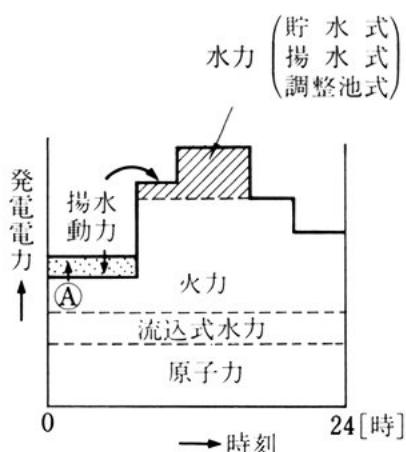



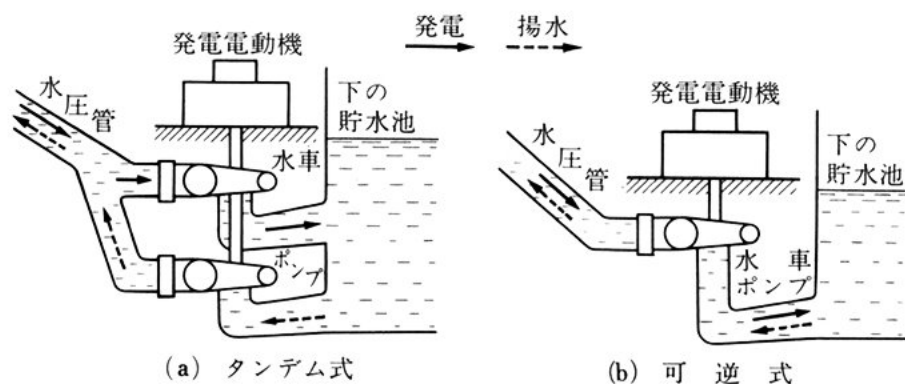
図21 積算流量曲線　　図22 発電電力の使い方

ク負荷時に増加する電力は，調整池式発電やその他の水力発電で補助的に供給している。

火力発電を高効率を保って運転するためには，需要電力の少ない深夜でも運転を続けることが望ましい。そこで，図22において，Ⓐで示される夜間の火力発電の余剰電力を利用して，水力発電所で，一度使った水を，下の貯水池から上の貯水池までくみ上げておけば利用価値が高く，翌日のピーク負荷時に再度使用することができる。この発電方式を**揚水発電**という。

揚水発電には図23(a),(b)に示すタンデム式と可逆式とがある。タ

図23 揚水発電

(a) タンデム式　　(b) 可逆式

ンデム式は，水車のほかにポンプも設備される。発電時には，上方の水を利用して水車→発電機として運転し，揚水時には，電力を利用して電動機→ポンプとして運転する。**可逆式**は，水車とポンプを兼用するもので，最近の揚水発電ではほとんどこの方式が採用されている。

問 12. 流量の調整のしかたによって発電方式を分類し，説明せよ。

問 13. 揚水発電は，水をくみ上げるのに要する電力量に対し，その水によって発生する電力量は少ない。それでも揚水発電がなりたつ理由を考えよ。

5. 水　車

(1) 衝 動 水 車

図 24 に示すように，水圧管の先端がノズルになっていると，有効落差 H [m] は全部運動エネルギーとなり，水は噴流となって噴出し，羽根車の羽根（バケット）に当たって，羽根車を回転させる。このように，水の衝撃力で回転する水車を**衝動水車**といい，図 25 に示す**ペルトン水車**（Pelton wheel）はその例である。この水車は，軸と，軸を除く回転部分の羽根車（ランナ）とで構成されている。

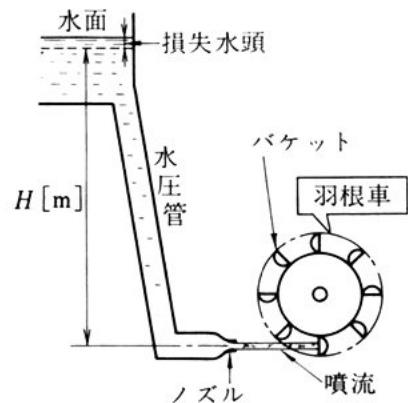



図 24 衝 動 水 車

この水車は，高落差で，流量の比較的少ない場所に用いられる。

バケットは図 25 (a) に示すように，わんを 2 個並べた形をしており，中央は鋭い水切りになっている。ノズル内には，図 (b) に示す**ニ**

(a) バケット

(b) ニードル弁・そらせ板

(c) ランナ

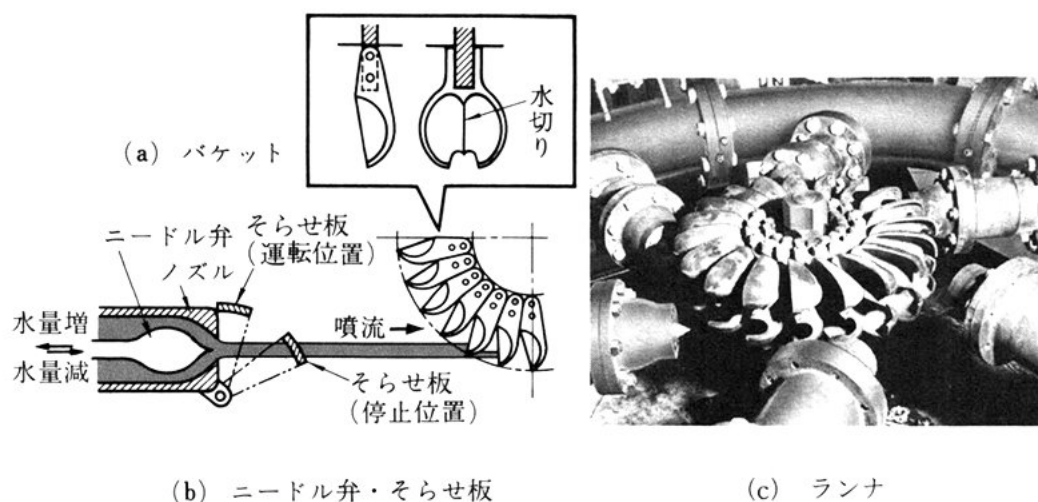



図 25　ペルトン水車

ードル弁があって，負荷の出力変化に応じて水量を調整する。

水車を急に停止させるとき，ニードル弁で噴流を急に止めると，水撃作用が大きくなって危険である。そこで，図(b)のそらせ板を停止位置にして，噴流の向きを変えて水車へ入力を0にし，そのあとで，ゆっくりニードル弁を閉じるようにする。

(2)　反　動　水　車

衝動水車のノズルは，水を噴出するときにその反作用を受ける。それで，図26(a)に示すように，水圧管の先端に図(b)に示すうず巻形の羽根をもった羽根車をつけ，水が羽根の間を流れる間に，圧力によるエネルギーが運動エネルギーに変わるようにすると，水が羽根をけって羽根車から流出するときに，羽根に力（反動力）が働いて，水車を回転させる。このような水車を**反動水車**といい，フランシス水車・プロペラ水車・カプラン水車はその例である。

吸出し管　図(a)に示すように，水車から大気中に放水すれば，羽根車出口における大気圧 p_0 [Pa]，流速 v_2 [m/s] に相当するエネルギーは利用できず損失となる。そこで，この損失を回収するため

(a) 反動水車　(b) 羽根車　(c) 吸出し管

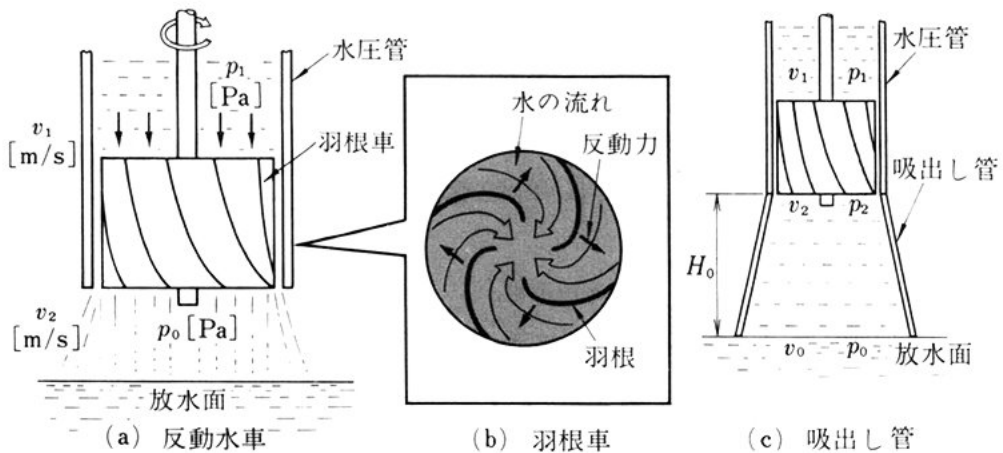



図 26　反動水車の原理

に**吸出し管**とよばれる管を設ける。図(c)に示すように，羽根車出口と放水面の間の落差 H_0 [m] を末広の吸出し管で連結すると，羽根車出口の圧力水頭は，ベルヌーイの定理により，次の式で表される。

$$\frac{p_2}{1000\times9.8}=\frac{p_0}{1000\times9.8}-\left(\frac{v_2{}^2-v_0{}^2}{2\times9.8}+H_0\right)\ \ [\mathrm{m}] \qquad (9)$$

ここで，$v_2>v_0$ であるから，羽根車出口の圧力 p_2 [Pa] は，大気圧 p_0 [Pa] 以下になり，それだけ羽根車入口と出口の間の圧力差 p_1-p_2 [Pa] が増すので，水車の出力が増加する。これは，吸出し管のない場合（図(a)）の羽根車出口の圧力および運動エネルギーの一部が，吸出し管によって回収されたことになる。

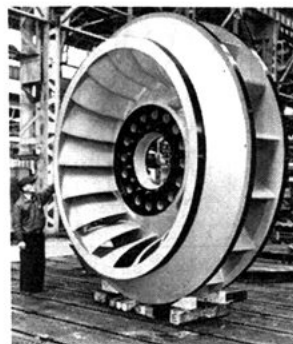
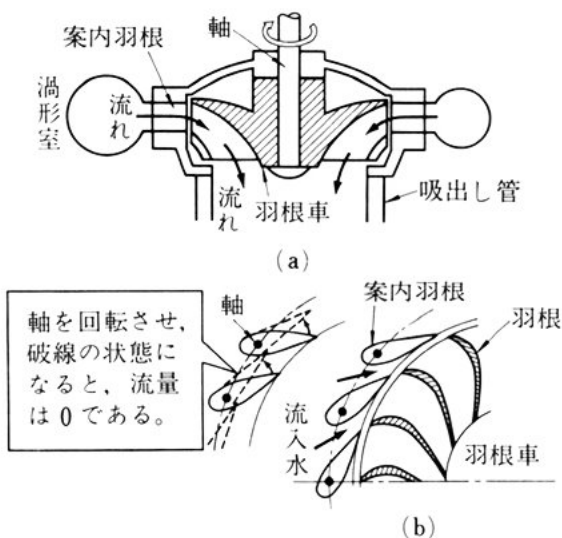
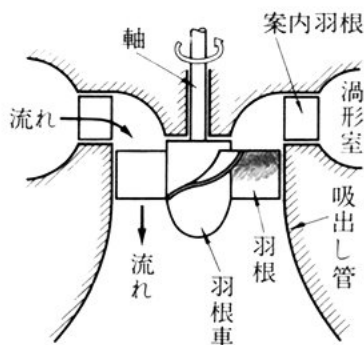
式(9)の H_0 [m] を大きくして（吸出し管の高さを高くして），p_2 [Pa] を非常に小さくしようとすると，流水部に空洞（真空部）を生じるようになる。この空洞の発生を**キャビテーション** (cavitation) という。キャビテーションが生じると，水が蒸発し，空気が遊離してあわを生じ，そのあわの衝撃力によって，羽根その他の流水に接する金属を浸食したり，振動や騒音を生じる。そのため，実際には吸出し管の高さは 6〜7 [m] 以内にしている。

(c)　ランナ

図 27　フランシス水車

フランシス水車 (Francis turbine)　図27(a)は，フランシス水車の断面である。図(b)の案内羽根の開度によって，羽根車に流入する水の流量を変え，水車の出力を調整する。この水車は，その形によって特性が変わり，落差30～300[m]の広い範囲にわたって用いられる。

プロペラ水車 (propeller water turbine)　図28は，プロペラ水車の略図である。羽根車には，扇風機の羽根のような形をした，4～8枚の羽根がついていて，高速度で回転するから，流量が多く，低落差の場所に用いられる。

図 28　プロペラ水車

カプラン水車 (Kaplan turbine)　プロペラ水車とほぼ同じ形であるが，負荷の変動に応じて羽根を動かしても，効率が変わらないようにしてある。

(3) 比 速 度

ある水車と幾何学的に相似なもう一つの水車を仮想し，この仮想水車を1［m］の落差で，1［kW］の出力を発生するような寸法としたときの，その仮想水車の回転速度［rpm］を，もとのある水車の**比速度**（specific speed）という。

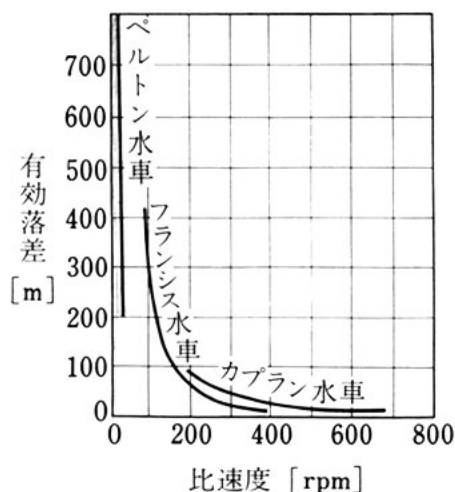



図 29 水車の有効落差と比速度

図29からわかるように，ペルトン水車は，比速度が小さく，カプラン水車は，比速度が大きい。

比速度の大きな水車を大きな落差で使用し，吸出し管を用いると，放水速度（吸出し速度）が大きくなって，キャビテーションを生じる。そこで，各水車には，その比速度に適した有効落差があり，図29は，その関係を示したものである。

(4) 水 車 効 率

水車において，理論水力 P_0［kW］に対する水車出力 P_w［kW］の比を**水車効率**という。図30に，各水車の効率と出力の関係を示す。

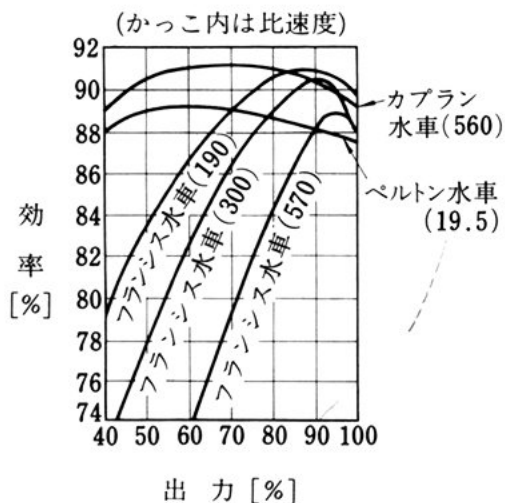
問 14． 比速度の小さな水車が大きな落差に使用される理由は何か。

問 15． 図25のそらせ板の働きを調べよ。

図 30 水車の効率と出力

問 16.　衝動水車と反動水車の違いは何か。

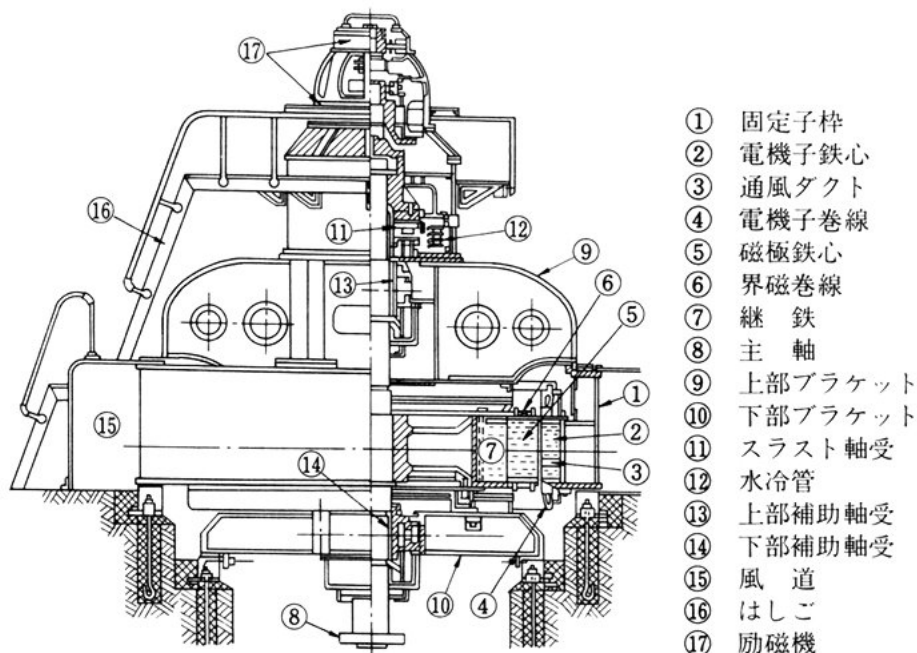
6. 水力発電所

(1)　水力発電所の構成

水力発電所は，水のもつエネルギーを最も有効に利用するために設備される水力施設と，それによって得られる水力を電気エネルギーに変換し，需要場所へ送り出す電気設備とから構成されている。

水車発電機　　交流電力を発生する発電機は，三相同期発電機であって，**主発電機**とよばれる。その軸は，水車軸に直結されていて，水車に与えられた動力を電力に変換するので，この発電機は**水車発電機**とよばれる。

落差を有効に利用するため，図 31 に示すように，水車を下方にし

図 31　立て軸形水車発電機

た立て軸形にすることが多い。また，立て軸形にすれば，水車と発電機の占有面積も小さくなる利点がある。

水車の回転速度は，大きくても 1000 [rpm] 程度で比較的小さく，商用周波数の交流を発生させるためには，水車発電機の磁極の数を多くしなければならない。したがって，水車発電機の形は，軸方向に短く，直径が大きくなっている。また，水車発電機は，界磁巻線の冷却がしやすい突極形の回転界磁形に作られる。

磁極を励磁する励磁機は，最上部に設けられる。励磁機としては，直流分巻発電機がよく用いられる。また，主励磁機を他励発電機とし，その励磁には，分巻発電機の副励磁機が用いられる。図 32 (b) は，この例である。

周波数・電圧調整　周波数と電圧の大きさを一定に保つために，図 32 (a)，(b) に示す方法がとられている。

図 32 (a) は，周波数すなわち水車の回転速度を一定に保持する **調**

図 32 調速機と電圧調整器

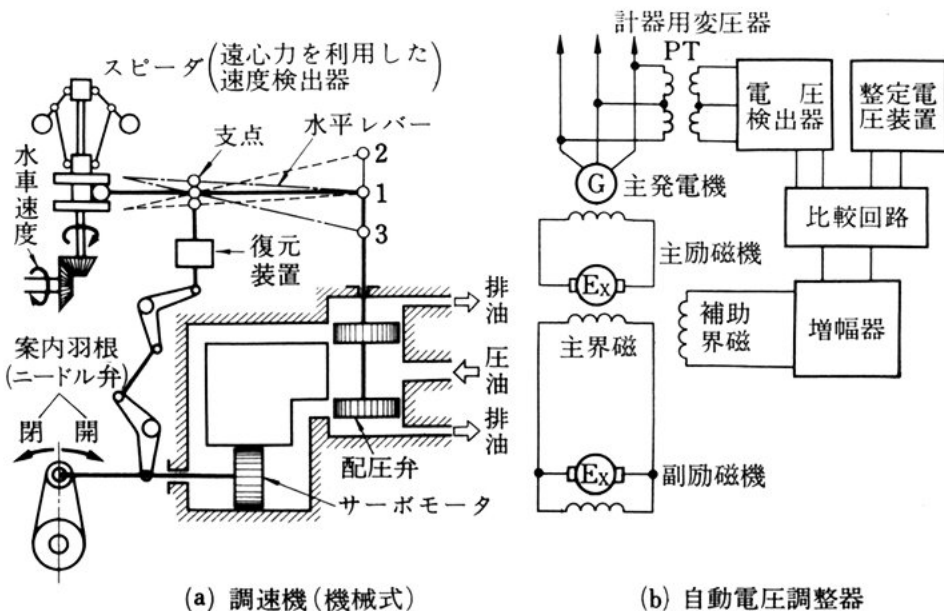
(a) 調速機（機械式）　　(b) 自動電圧調整器

速機の原理図である。図で，負荷が減少し，水車速度が上昇すると，スピーダが上がり，水平レバーの右端が下がり，サーボモータとよばれるものの左側に圧油が移動し，案内羽根が閉じ，流量が減少し，水車速度が小さくなる。同時に，復元装置で水平レバーを押し上げて，圧油の移動を止める。続いて，スピーダの下降で，水平レバーはもとどおりになる。

図32(b)は，電圧を一定に保持する自動電圧調整器の回路図である。図では，主発電機電圧を検出し，整定電圧と比較し，その差の電圧を増幅して，補助界磁の励磁を加減する。

主変圧器　発電機の発生電圧を変成して，大きな電気エネルギーを送り出す変圧器は**主変圧器**とよばれ，屋外用油入自冷式三相変圧器で，△-Y 結線が多く用いられる。

問 17. 発電所の電気設備に要求される事項を列記せよ。

（2） 水力発電所の運用

水力発電所にはいろいろな設備があるから，それらを操作・運転し，制御・調整するための設備が必要である。

配電盤室は，発電所の運転操作の中心部で，水車や発電機の監視・記録などを行うために，図33に示すような計器盤や制御盤が設けら

図 33 配電盤室

れている。

発電機盤・励磁機盤・変圧器盤などの計器盤には，電圧計・電流計・周波数計・電力計・力率計および同期検定器などのほか，機器各部の温度計が装置されている。また，水車軸受の温度や回転速度，案内羽根の開度，水槽や貯水池の水位などを測定するために，遠隔測定用計器も取り付けられている。

制御盤 は，水路系統・水車系統・電気系統などの制御を行うもので，それぞれの系統ごとに，模擬回路と制御スイッチおよび表示灯が設けられている。表示灯によって，スイッチの操作状態，すなわち運転状態が一目でわかるようになっている。

発電所の制御方式　以前は，運転員が機械のそばにいて，直接，弁を開いたり，ハンドルを回したりして操作していたが，現在では，配電盤室で，水車や発電機の始動・運転・停止などの制御を自動的に行っている。これは**1人制御方式**とよばれている。

このような自動化をさらに進めて，無人化の**遠隔監視制御方式**も行われている。これは，監視，制御される発電所1〜2か所を，離れた親発電所から，運転・停止操作・出力調整および監視を行うものである。

一つの河川に多くの発電所がある場合，上流の調整池で水を貯水しているときは，下流へは水を流下しないし，また，流下時間や，個々の発電所の使用できる可能流量の差などもあって，例えば，ピーク負荷時に各発電所を都合よく全負荷運転することは困難である。そこで，河川に沿って点在する発電所群5〜7か所を，総合効率を高めるように，ある場所から集中的に監視・制御することが行われる。これらの運転制御は24時間体制で行われ，運転計算・記録処理などには電子計算機が使われている。このような方式を **集中制御方式** と

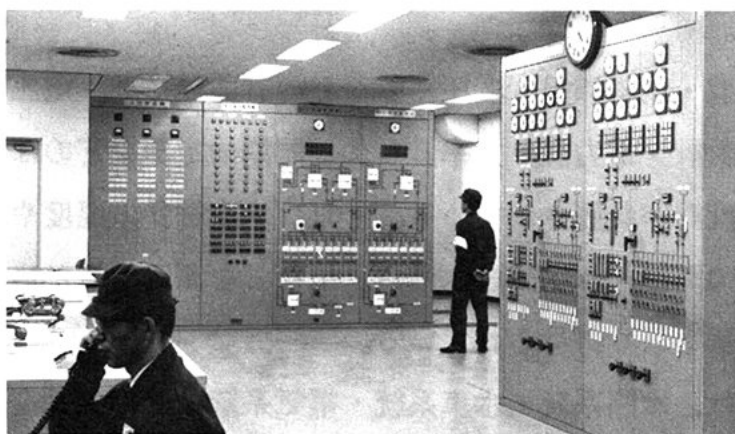



図 34 集中制御室

いい，それを行う場所を**自動制御所**という。図 34 は，自動制御所の集中制御室の例である。

問 18. 集中制御すると，どのような利点があるか。

問 19. 水力発電所を構成する水力設備・電気設備を列記せよ。

問 20. 発電所の制御方式を列記し，説明せよ。

問 21. 水車発電機は立て軸形にすることが多い。なぜか。

問 題

1. 図 35 は，電力の日負荷曲線の発電分担を，A，B，C に分けて考えた例である。次の問いに答えよ。

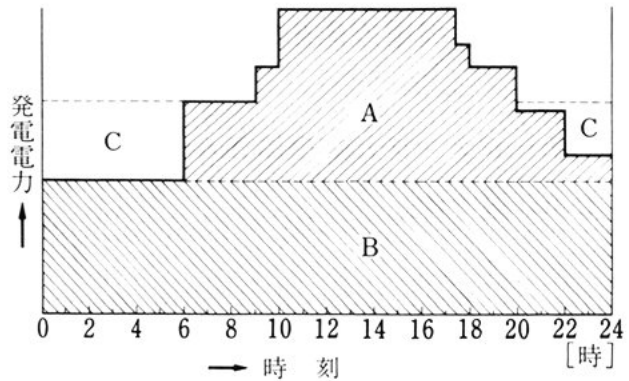



図 35

(1) B の発電は，火力発電・原子力発電が主であるが，一部，水力発電も含まれている。どんな水力発電が考えられるか。

(2) A の発電は，主として水力発電で，一部，火力発電も含まれている。その水力発電としては，どんな発電方式があるか。

(3) C の部分は，揚水発電に利用される電力である。この電力で揚水し，ふたたび電力にすることは不経済であるが，この発電方式がなりたつ理由を説明せよ。

2. 図 36 で，水管内を水が充満して流れている。断面 A で，内径 2.4 [m]，流速 3 [m/s]，圧力 24 [Pa] であれば，内径 2 [m] の断面 B では，流速はいくらか。また，水圧はいくらか。

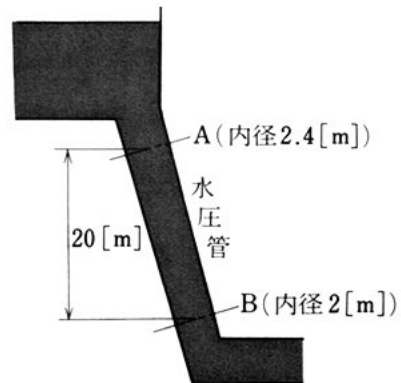



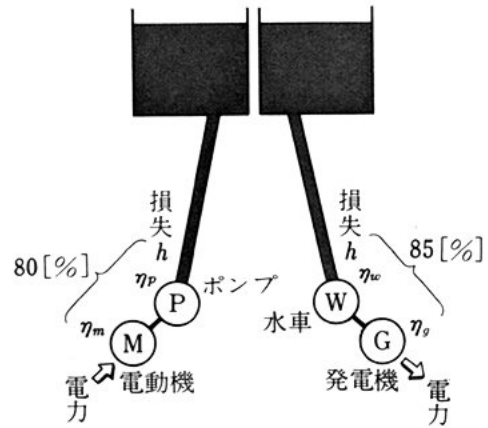
図 36

3. 図 37 に示すように，揚水発電所で，揚水総合効率（電動機→ポンプ）を 80 [%]，発電総合効率（水車→発電機）を 85 [%] とすると，110 [MW·h] の電力量で揚水した貯水を使って，最大出力の発電を継続できる時間はおよそいくらか。ただし，発電機定格出力を 35 [MVA] とし，負荷力率は 100 [%] とする。

4．理論水力は $P_0=9.8QH$ [kW] である。流量 Q [m³/s] および落差 H [m] のとり方によって，発電方式を分類せよ。

5．サージタンクと水槽はどんな点が違うか。

図 37

5

3 火力発電

この節の目標　我が国の火力発電は，その大部分が汽力発電であるから，ここでは，火力発電所として汽力発電所を取り扱う。

そこで，まず，蒸気についての性質を調べ，次に，蒸気を発生し，利用するための設備や，そのエネルギーを機械エネルギーに変換する装置などについて調べる。

また，熱エネルギーがどれだけ有効に電力になるかという熱効率などについても学ぶ。

1. 蒸気のする仕事

(1) 蒸気の性質

エンタルピー　ボイラで水を加熱すると，加えた熱エネルギーは水の温度を上昇させるために使われ，また沸点に達すると，水が蒸気に状態を変えるために使われる。例えば，温度は一定で，水を蒸気の状態に変えるために必要な熱エネルギーを**潜熱** (latent heat) という。それに対して，例えば，水を蒸気の状態に変えないままで温度を上昇させるために必要な熱エネルギーを**顕熱** (sensible heat) という。

高温・高圧の蒸気は，加えた熱エネルギーをいろいろな形で蓄えている。このエネルギーを**エンタルピー*** という。エンタルピーは [J/kg]，または [kcal/kg] で表す。

* エンタルピーは，0.01 [°C]，611.2 [Pa] (0.006233 [kgf/cm^2]) のとき（水の三重点）の水のエンタルピーを基準として表す。

エンタルピーが大きくなると，蒸気はそれだけ仕事をする能力をもつようになる。また，蒸気がタービンを回転させる仕事をすると，蒸気のエンタルピーはそれだけ小さくなり，蒸気の温度や圧力が低下する。

飽和蒸気と過熱蒸気　温度が一定，圧力が一定の状態で沸騰しているときの水を**飽和水**，蒸気を**飽和蒸気**という。また，このときの温度（沸点）を**飽和温度**，圧力を**飽和圧力**という。

ボイラ内の蒸気は，実際には微細な水分を含んでおり，飽和水と飽和蒸気との混合物（**湿り飽和蒸気**）である。これらをさらに加熱すると，飽和水を含まない飽和蒸気（**乾き飽和蒸気**）になる。乾き飽和蒸気をさらに加熱したものを**過熱蒸気**という。

乾き飽和蒸気では，タービンを回転するなどの仕事をすると，エンタルピーが減少し，飽和温度以下になって，水滴を生じるようになる。この水滴は，タービンの回転を妨げるので，水滴が生じないような範囲の蒸気が必要である。

火力発電所では，温度が 570 [°C]，圧力が 18 [MPa]（180 [kgf/cm^2]）程度の過熱蒸気が使われている。

臨界状態　圧力を高くすると水の沸点（飽和温度）は高くなり，潜熱は小さくなる。蒸気の圧力を 22.12 [MPa]（225 [kgf/cm^2]）まで高くすると，飽和温度は 374 [°C] となり，潜熱は 0 となる。また，水と蒸気の密度も等しくなり，飽和水と飽和蒸気との区別がつかなくなる。この状態を**臨界状態**といい，このときの温度を**臨界温度**，圧力を**臨界圧力**という。

貫流ボイラ（49 ページ参照）では，臨界温度・臨界圧力以上の過熱蒸気を発生させて使用するが，この蒸気の温度は 560 [°C]，圧力は 25 [MPa]（250 [kgf/cm^2]）にもなる。

問 1． 飽和蒸気・湿り飽和蒸気・乾き飽和蒸気・過熱蒸気を区別して説明せよ。

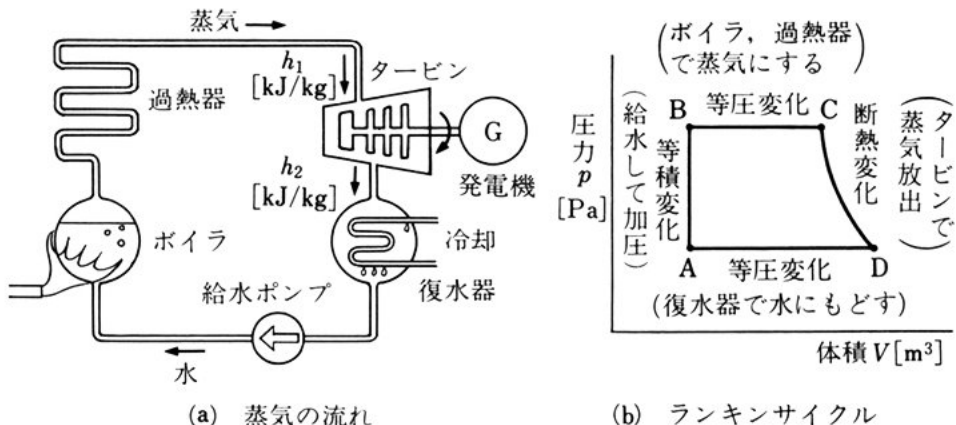
問 2． 臨界状態とは何か。

（2） 蒸気のする仕事

火力発電所では，図1(a)に示すように，ボイラで発生した高温・高圧の蒸気は，過熱器(49ページ参照)でさらに加熱され，過熱蒸気となって蒸気タービンに流入する。ここで蒸気は膨張し，その力がタービンの羽根に働いてタービンを回転させる。このため，高温・高圧の蒸気は，そのエネルギーを失い，低温・低圧の蒸気となって，排出され，復水器(52ページ参照)によって水となり，ふたたびボイラへもどる。このように，いろいろな変化を経て完全にもとの状態にもどる過程を**熱サイクル**という。この過程を体積 V [m³]，圧力 p [Pa] の関係で示すと図(b)となる。Aは給水ポンプ入口，Bはボイラ入口，Cはタービン入口，Dはタービン出口である。図(b)に示す熱サイクルは，火力発電では最も基本的なもので，**ランキンサイクル**とよばれる。

タービン入口の蒸気のエンタルピーを h_1 [kJ/kg]，タービン出口

図 1　蒸気のする仕事

(a) 蒸気の流れ　　(b) ランキンサイクル

のエンタルピーを h_2 [kJ/kg] とすると，タービンの羽根に与えるエネルギーすなわち，蒸気のする仕事 h は，次の式で表される。

$$h = h_1 - h_2\,[\mathrm{kJ/kg}] = h_1 - h_2\,[\mathrm{kW \cdot s/kg}]$$
$$= \frac{h_1 - h_2}{3600}\,[\mathrm{kW \cdot h/kg}] \qquad (1)^{*}$$

2. 燃料と発熱量

（1） 燃料の性質

火力発電所で用いられる燃料は，主として重油・天然ガス・石炭などであるが，石油危機を契機に，重油から天然ガス・石炭への燃料転換が進んでいる。

表1は，これらの燃料の貯蔵・輸送・性状について管理上の特徴を示すものである。

表1　各種燃料の比較

	重　油	天然ガス	石　炭
貯蔵	変質は少ない。 密閉容器が必要。 火気に対する危険性は大。	変質は少ない。 密閉容器が必要。 火気に対する危険性最も大。	風化しやすい。 広い場所が必要。 火気に対する危険性は小。
輸送	管とポンプで輸送できる。	圧縮できる。 管とポンプで輸送できる。	大きな動力と人力が必要。
性状	水分・灰分は少ない。 発熱量大。 性状均一。	水分・灰分はほとんどない。 発熱量大。 性状均一。	水分・灰分が多い。 発熱量小。 性状はいろいろ。

* h の単位は，[kJ/kg]，[kW・s/kg]，[kW・h/kg] のどれを用いてもよい。

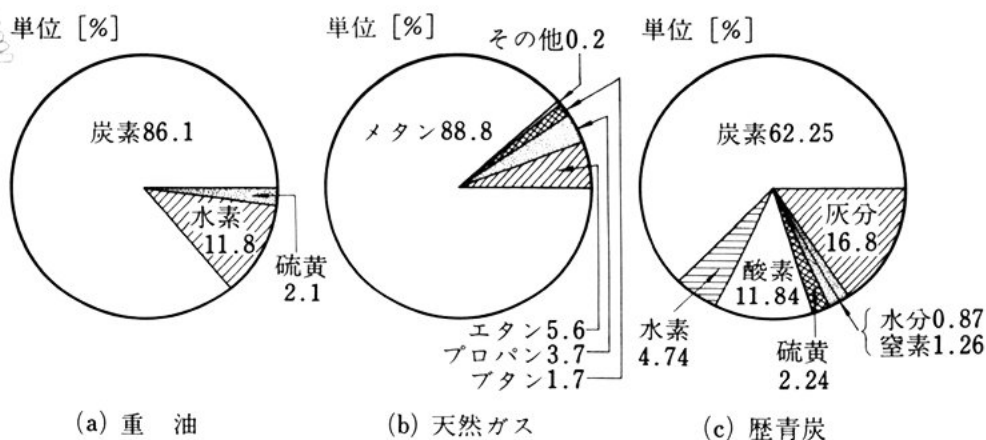



図 2　燃料の分析成分

重　油　重油は，原油から揮発油・灯油・軽油などを分留した残りの油で，発熱量が高く，しかも燃焼効率がよいので，負荷の変動に即応できるほか，運搬が容易で，しかも安価であるため，広く用いられている。しかし，図2(a)のように，硫黄分を含む重油は，燃焼時に亜硫酸ガス（SO_2）を発生し，公害防止上問題がある。公害防止の対策としては，1）低硫黄原油（硫黄分0.1〜1.6［%］）から重油を作る，2）重油を脱硫する，3）原油を生だきする（硫黄の含有率が重油にした場合より低い），4）排ガス中の硫黄分を除去する，などの方法がとられている。

天然ガス　天然ガスを液化したものを**液化天然ガス**（liquified natural gas : **LNG**）という。LNGは，液体であるから，表1に示すように，輸送や貯蔵に便利である。図2(b)は，ブルネイ産の天然ガスの化学成分で，硫黄を含まないので，都市過密地域の発電用燃料として用いられる。

石　炭　石炭は，炭化の程度によって，炭素の多い（発熱量が大きい）**無煙炭**，揮発分の多い（着火が容易である）**歴青炭**などがある。発電用には，発熱量は無煙炭に劣るが，揮発分の最も多い歴青炭が

用いられる。図2(c)はその化学成分である。

石炭も燃焼時には亜硫酸ガスや窒素酸化物などを発生するので，排煙を脱硫したり，完全燃焼させて窒素酸化物の発生を抑えるなどの工夫がなされている。

(2) 発　熱　量

燃料の燃焼にあずかる成分は，炭素・硫黄・水素で，これらが理論的に完全に燃焼するとき発生する熱量を，その燃料の**高発熱量**という。

一方，燃料中には水分が含まれることがある。また，水素が燃焼すると水を生じる。これらの水は，実際の燃焼装置では，蒸発して潜熱をうばい，その潜熱をもったまま大気中に放出される。

そこで，熱量として実際に役にたつのは，高発熱量から，水分を蒸発するために消費される熱量を差し引いたもので，これを**低発熱量**といい，ふつうこの値で燃料の発熱量を表す。

図3は，火力発電所で用いられるいろいろな燃料の発熱量を比較したものである。重油1.00 [l] の発熱量は約 4.04×10^4 [kJ] である。他の燃料がこれと同じ発熱量を得るために必要な量を示している。

問 3. 液化天然ガスの発熱量は，重油の発熱量のおよそ何倍か。

図 3　燃料換算と等価割合

燃料	重　油	原　油	ナフサ	LNG	石　炭
発 熱 量	4.04×10^4 [kJ/l]	3.85×10^4 [kJ/l]	3.24×10^4 [kJ/l]	5.44×10^4 [kJ/kg]	2.51×10^4 [kJ/kg]
等価割合	1.00 [kl]	1.05 [kl]	1.25 [kl]	742 [kg]	1610 [kg]

3. 燃焼装置とボイラ設備

(1) 燃 焼 装 置

燃料を完全燃焼させるために，燃料の性質に適した燃焼装置が工夫されている。

LNG 燃焼 図 4 (a) に示すように，LNG タンクの液体ガスを気化器により液体を気体にし，それを一時ガスホルダに集め，燃焼室で燃焼させるものである。

微粉炭燃焼 図 4 (b) に示すように，微粉機で石炭を微粉にし，空気とともにバーナを通じて燃焼室（火炉）に吹き込み，燃焼させると，液体燃料のように爆発的に燃焼させることができる。

重油燃焼 重油を加熱して粘度を下げ，霧状にして空気とともに図 4 (c) に示す重油バーナから，炉内に噴射して燃焼させるものである。燃焼室は，微粉炭燃焼の場合とほとんど同じである。

図 4 燃 焼 装 置

(a) LNG燃焼

(b) 微粉炭燃焼

(c) 重油バーナ

(a) 自然循環ボイラ　(b) 強制循環ボイラ　(c) 貫流ボイラ

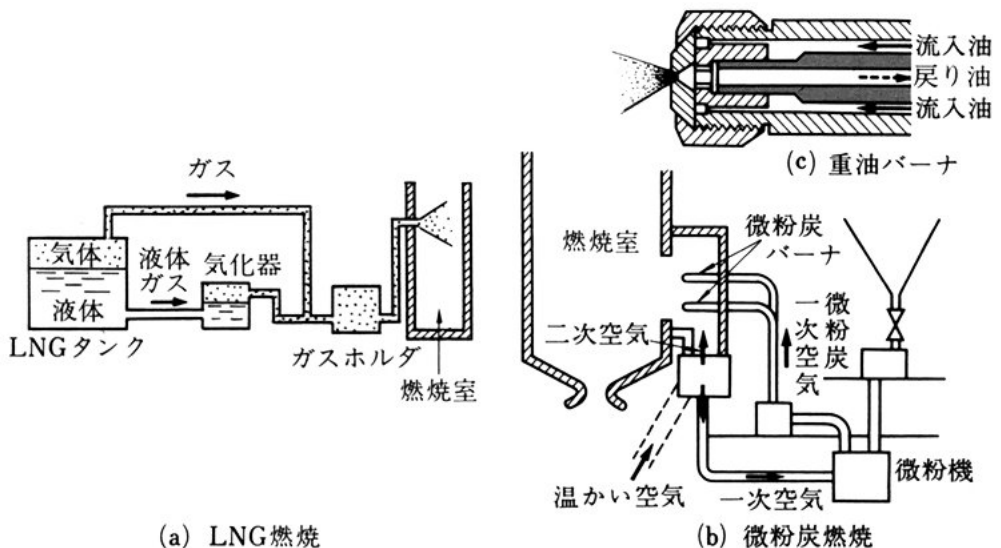
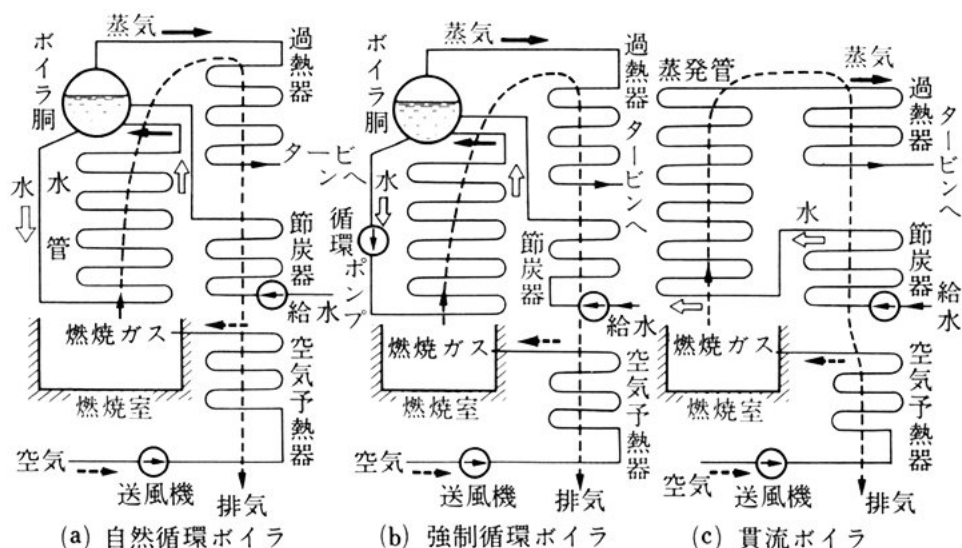



図 5　ボイラ設備の構成

(2) ボイラ設備

ボイラ設備は，燃焼ガスの熱エネルギーを，有効に水・蒸気に与え，さらに，できるだけ多くの熱を回収するよう工夫されている。

自然循環ボイラ　図5(a)に示すように，燃焼室で発生した高温の燃焼ガスは水管群に熱を与える。そこで，ボイラ胴から水管に降下した水は，さかんに蒸気となり，ボイラ胴に入る。このように，水・蒸気が自然に循環し，発生した蒸気は，ボイラ胴の上方で水分と分離され，タービンへ送られる。これを**自然循環ボイラ**という。図6はボイラ胴の一例である。

強制循環ボイラ　ボイラの蒸気圧が高くなると，飽和蒸気と水との密度差が小さくなり，ボイラ胴と水管の間で，水と蒸気の自然循環が困難になる。そこで，高圧力のボイラでは，図5(b)に示すよう

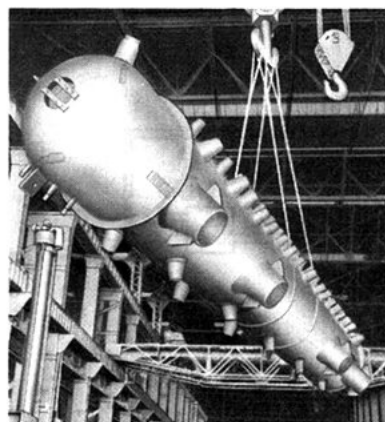



図 6　ボイラ胴（運搬中）

に，循環ポンプで強制循環させる。これが**強制循環ボイラ**である。

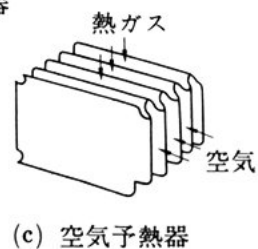
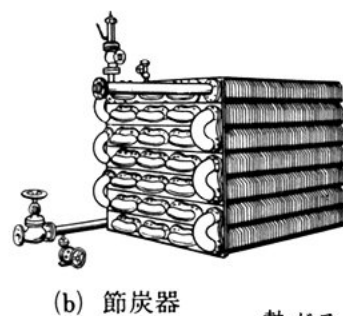
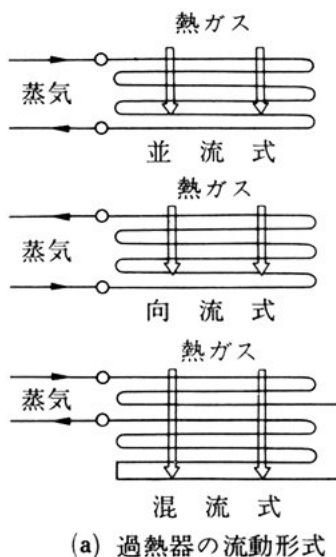
貫流ボイラ　図5(c)に示すように，長い管の一端から給水ポンプで水を押し込み，途中で蒸発管により加熱し，発生した蒸気を過熱蒸気にして，他端からタービンへ送り込むボイラを**貫流ボイラ**という。貫流ボイラは，ボイラ胴を必要としない特徴があり，臨界圧力・臨界温度以上の過熱蒸気を得る場合に用いられる。

過熱器　図5(a)，(b)からわかるように，ボイラ胴からの飽和蒸気は，**過熱器**を通過する間に，燃焼ガスの熱で過熱蒸気になる。過熱器は，一般に，炭素鋼管・ステンレス鋼管などで作られ，燃焼室の出口付近に設置される。図7(a)は，過熱器の形式を示したものである。蒸気の流れと熱ガスの流れが同方向の並流式，逆方向の向流式，それら両形式を組み合わせた混流式がある。

節炭器　過熱器を通過した燃焼ガスは，なお多くの熱量をもっている。そこで，この熱で図5(a)，(b)に示すように，ボイラへの給水を加熱すると，それだけ熱を回収したことになる。これを**節炭器**と

図7　過熱器・節炭器・空気予熱器

(a) 過熱器の流動形式

(b) 節炭器

(c) 空気予熱器

いい，煙道内におかれる。その燃料節約高は，少なくとも 4～7 [%]，多いものは 11～20 [%] といわれる。図 7 (b) は，節炭器の例である。

空気予熱器　燃焼室に送り込まれる空気の温度が高いと，燃焼が促進され，送り込む空気量は少なくてよい。この目的に用いられるものが図 7 (c) に示す**空気予熱器**で，煙道内に設備される。

問 4．燃焼ガスの発生後，それが空気中に放出されるまでの間に，その熱を吸収する設備を順に挙げ，それらの機能を述べよ。

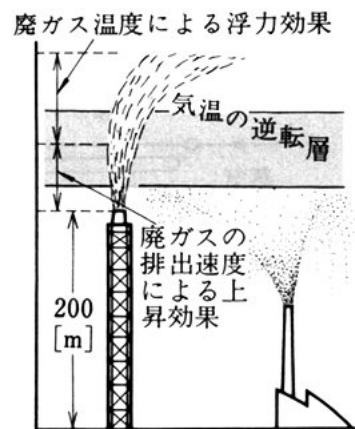
(3)　公　害　対　策

火力発電所の公害対策は，大気汚染をいかに防止するかである。そのため，燃料の脱硫黄・脱窒素酸化物や脱ばい煙などの対策を施している。

煙突から排出される灰は，煙害をもたらすので，集じん装置を用いて，灰粒子を取り去る。この場合，98 [%] 程度が除去される。

廃ガス中の SO_2 を除去するには，活性炭に吸着させたり，活性酸化マンガンの粉末を吹き込んで吸収させるなどの方法がとられる。

図 8　煙　　突

図 8 に示すように，上空には気温の逆転層が生じることが多い。そのため，低い煙突では上空に拡散しにくくなり，スモッグの原因となる。このような場合でも，廃ガスが上空へ拡散するように，次のような工夫がなされる。すなわち，廃ガスの排出速度を高めるため，送風機を用いたり，高さ 200 [m] 程度の超高煙突を用いる。また，煙突の強度を増すと同時に，廃ガスの温度が低下しないようにし，浮力効果が小さくならないようにするため，数本集めた集合煙突を用いることもある。

問 5. 廃ガスの温度が高いと，煙の浮力効果が大きい。この点から集合煙突について調べよ。

問 6. ボイラの種類を三つ挙げ，それぞれの特徴を述べよ。

問 7. 火力発電所の公害およびその対策について調べよ。

5

4. 蒸気タービン

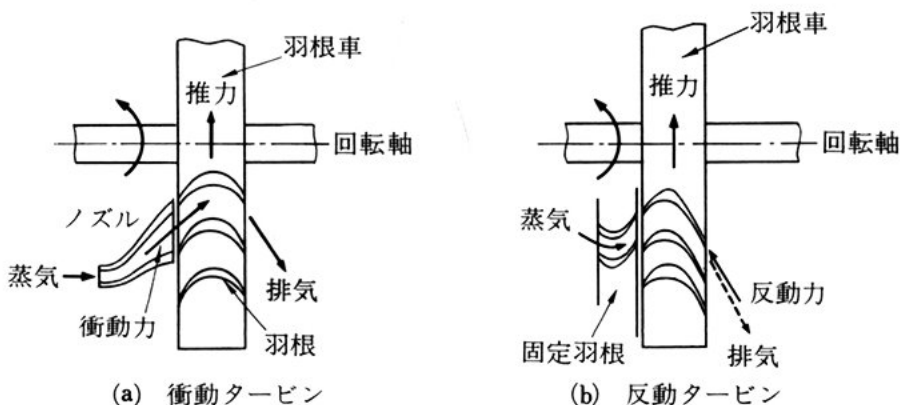
(1) 蒸気タービンの原理

高温・高圧の蒸気を図 9(a) に示すノズルを通じて膨張させると，高速の蒸気が得られる。これは，蒸気が膨張することによって減少したエンタルピーが，運動エネルギーに変化したのである。

10 この高速の蒸気が，図 9(a) の羽根にぶつかる力で羽根車を回転させる。この方式のタービンを **衝動タービン** という。羽根の間の蒸気の通路の面積が一様であり，羽根の出入口の蒸気の圧力は等しい。

羽根車の内部で蒸気を膨張させ，図 (b) に示すように，排気するときの蒸気の反動力を利用して羽根車を回転させる方式のタービンを

15 **反動タービン** という。羽根車の間の蒸気の通路がしだいに狭くなっているため，出口へ進むに従って蒸気の速度が上昇し，圧力が低下する。

図 9 蒸気タービン

(a) 衝動タービン

(b) 反動タービン

図10は大形蒸気タービンの一例で，蒸気が高圧の間は衝動タービン（高圧部）を回転させ，低圧になると反動タービン（低圧部）を回転させるようになっている。

図10　大形蒸気タービンの内部と羽根車

(2) 復　水　器

蒸気タービンの排気を，図11(a)に示すように，冷却水で冷やすと，排気は凝縮して水となり，そこの圧力は真空に近い値（絶対圧力で3〜5［kPa］（300〜500［kgf/m^2］）程度）にまで下がる。そのため，蒸気タービン内の蒸気が，じゅうぶんに膨張し，それだけ蒸気タービンのする仕事の割合が増加する。

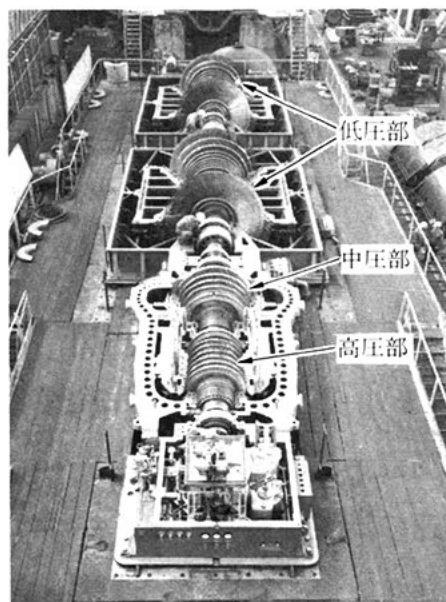
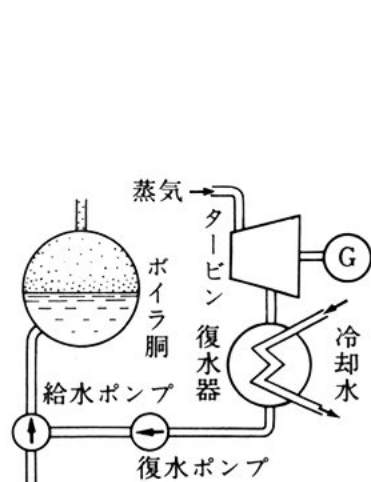
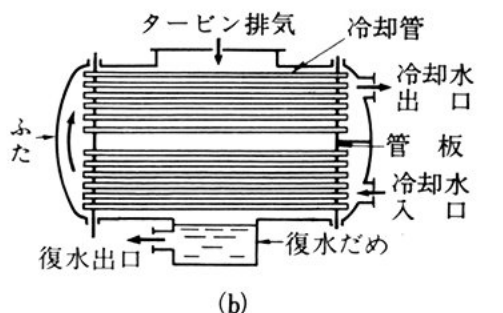
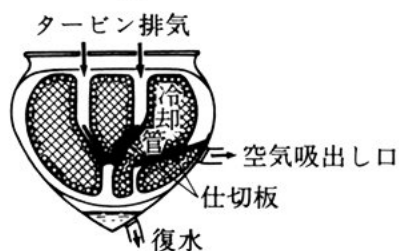



図11 復　水　器

(a)

(b)

(c)

また，凝縮してできた水（**復水**）は図11(a)に示すように，給水としてボイラへ送り，蒸気として回収できる。このような目的で設備されるものを**復水器**といい，図(b)，(c)に示すような構造になっている。密閉容器の中に，タービン排気を導き，冷却管に冷却水を通じ，蒸気を凝縮させ，それを下部の復水だめに集めるようになっている。

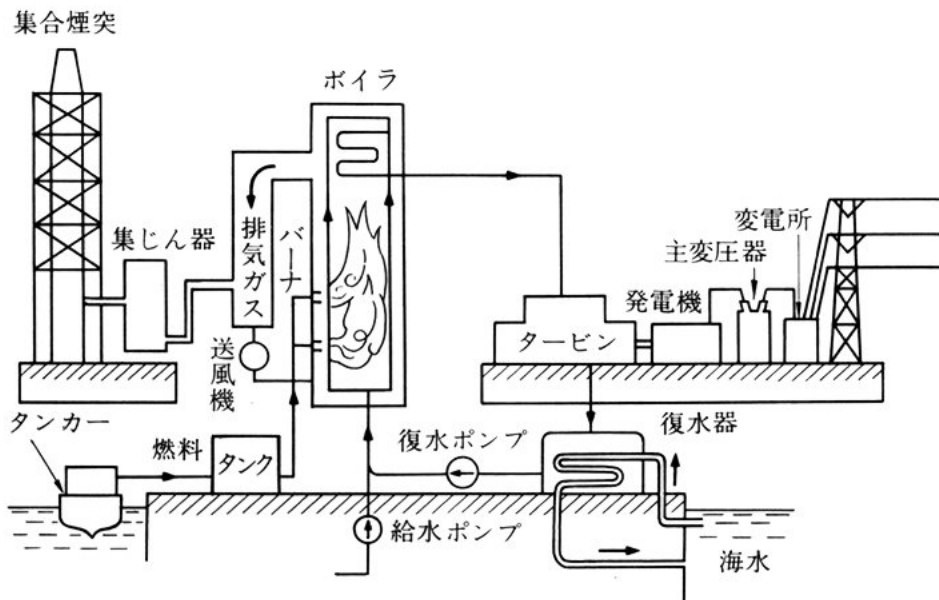
冷却水の量は，排気蒸気量の100倍程度の多量を使用するから，海水または河川の水が利用されている。

問8. 復水器の構造とその働きを説明せよ。

5. 火力発電所

(1) 火力発電所の構成

火力発電所の構成は，図12に示すように，燃焼系統・汽水系統・冷却系統・発電系統に分けられる。

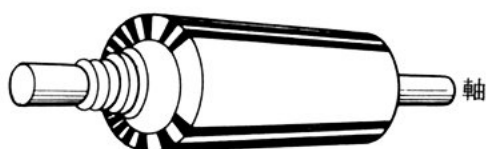
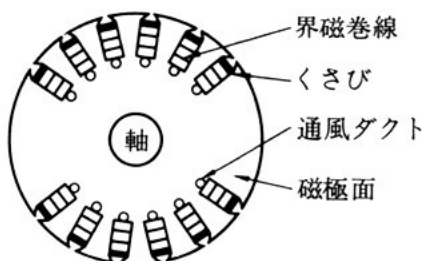
図12 火力発電所の構成

燃焼系統　図の左方に，燃料を貯蔵し，処理し，火炉まで運び入れるようすが示されている。炉内で発生した熱によって，水管群が加熱され，その中で水が蒸気に変わる。また，燃焼ガスは，過熱器・節炭器を加熱しながら煙道に入り，集じん器で灰分が除去され，煙突から排出される。

汽水系統　ボイラ胴で水と分離された飽和蒸気は，過熱器で過熱蒸気となり，タービンで仕事をして，復水器で水に凝縮され，ふたたびボイラ胴へ送り込まれる。

冷却系統　復水器でタービンの排気を凝縮させるための，冷却水の通路系統である。

発電系統　発電系統として主なものは，タービン発電機・主変圧器・変電所などである。

タービン発電機の原動機は蒸気タービンで，その回転速度は，水車に比べてはるかに大きい。そこで，2極機が多く，三相同期発電機としては周波数を f [Hz]，極数を p とすると，回転速度 N は，$\dfrac{120f}{p}$ [rpm] となるから，50 [Hz] 用では 3000 [rpm]，60 [Hz] 用では

図 13　タービン発電機

イ）図ア）の軸に垂直な断面図

(a) 非突極形回転子

(b) 水素冷却方式

3600［rpm］で運転される。

タービン発電機は，水車発電機に比べて回転速度が大きく，その遠心力に対する強度の関係から，図13(a)のような非突極形にし，水車発電機よりも直径を小さくしなければならない。出力は，直径の2乗と軸方向の長さに比例するから，所要電力を得るためには，タービン発電機の軸方向の長さが長くなる。ところで，軸方向に長くなると，熱放散が困難になるので，冷却方式にはいろいろの工夫がなされ，大出力タービン発電機の場合は，密封形水素冷却方式が使われる。この方式は，空気に比べて水素の比熱が大きく，熱伝達が良いということを利用したもので，その冷却効果は大きい。図13(b)は，水素冷却発電機の外観である。

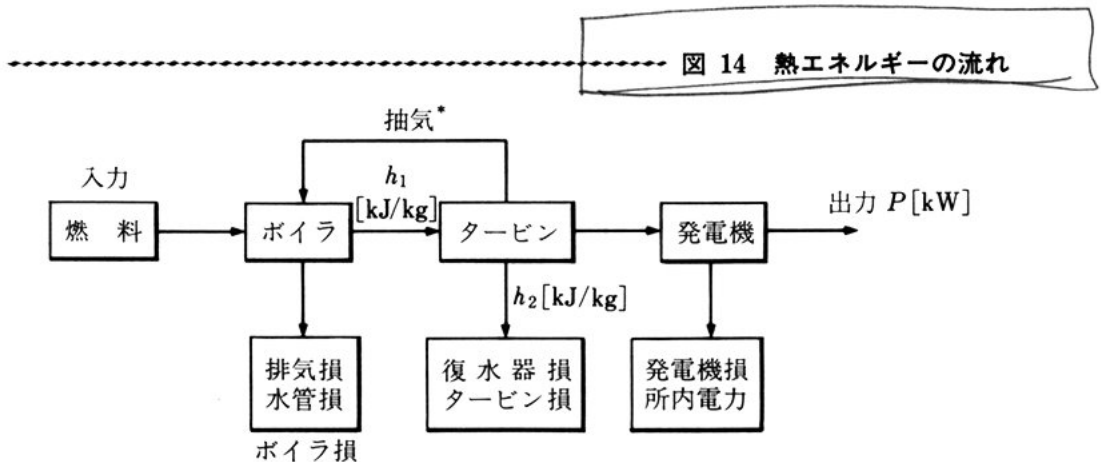
主変圧器・配電盤などは，水力発電所のものとほぼ同様である。

問 9. 水素冷却方式は，水素のどのような性質（効果）を利用したものか。

問 10. タービン発電機を水車発電機と比較せよ。

(2) 熱 効 率

発電用燃料の熱エネルギーは，図14のように，ボイラ・蒸気タービン・発電機を通じて電気エネルギーに変換されるまで，いろい

図 14 熱エネルギーの流れ

＊ 抽気とは，蒸気の一部を抜き出すことである。

ろの損失がある。

ボイラの効率　燃料の発熱量のうち，蒸気の発生に用いられるエネルギーの割合を**ボイラ効率**という。ボイラの熱損失としては，煙道ガスによるもの，燃焼の不燃焼・不完全燃焼によるもの，そのほかの放熱などがある。

蒸気タービンの効率　蒸気タービンで，熱エネルギーが有効に機械エネルギーに変換される割合 η_t [%] を**有効効率**といい，次のようになる。

$$\eta_t = \frac{3600P}{z(h_1 - h_2)} \times 100 \qquad (2)$$

ただし，h_1，h_2 [kJ/kg] は，図14に示すように，タービン入口および復水器入口の，それぞれの蒸気がもつエンタルピーで，z [kg/h] は使用蒸気量，P [kW] はタービンの出力である。

式（2）で，h_2 を復水のエンタルピー h_3 [kJ/kg] に置き換えると，$h_1 - h_3$ は，蒸気タービンを運転するために消費する熱エネルギーであり，このときの式（2）の値が蒸気タービンの熱効率である。また，燃料の発熱量に対する発生電力の割合を発電所の**熱効率**という。

発電所の熱効率　火力発電所の熱効率は，ボイラやタービンの熱効率のほか，発電機の効率などによっても異なる。すなわち，火力発電所の熱効率を η [%] とすれば，次のようになる。

$$\eta = \frac{(\text{送電端電力量 [kW・h]}) \times 3600}{(\text{燃料消費量[kg]}) \times (\text{燃料の発熱量[kJ/kg]})} \times 100 \qquad (3)$$

火力発電所の熱効率は 1 [%] 上昇しても，燃料は年間数 [%] の節約になるので，熱効率の向上に改善努力がなされている。最近の

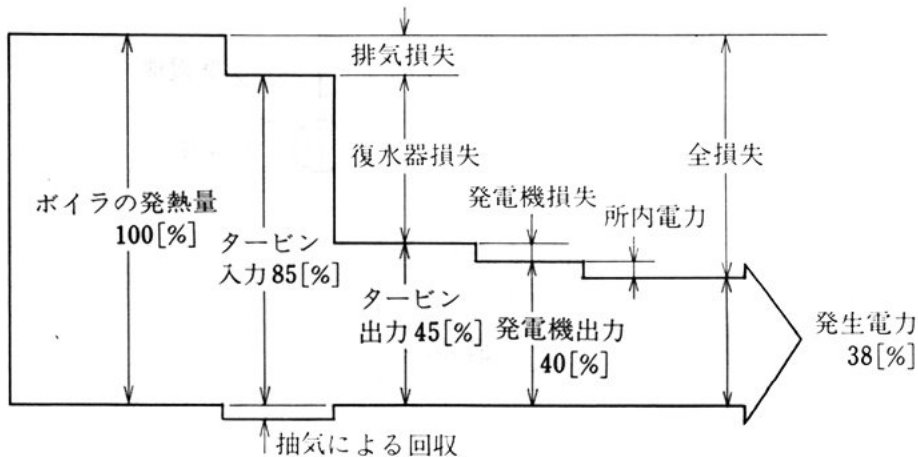



図 15 熱 勘 定 図

火力発電所の熱効率は 38 [%] 前後である。

熱勘定　熱効率を検討して，それを高めるには，熱エネルギーの移動状況を明らかにする必要がある。このような資料を得る作業を**熱勘定**という。図 15 は，それをもとに発電所の入出力・損失の関係を示したもので，**熱勘定図**とよばれる。

問 11. 発電所の熱効率を上げると，どんな利点があるか。

問 12. 最大出力 5000 [kW]，日負荷率 60 [%] の発電所で，20900 [kJ/kg] の石炭 4300 [t] を使用して，50 日間運転したとすれば，発電所の熱効率はいくらか。

問 13. タービン発電機と水車発電機の回転速度・磁極・冷却方式を比較せよ。

問　　題

1. 燃料として石炭や重油を使用すると，硫黄化合物を生じ，公害のもとになる。この除去法として，火力発電所でとられる方法を 3 段階に分けて調べよ。

2. 図 16 で，水と蒸気の循環過程のあらましを説明せよ。

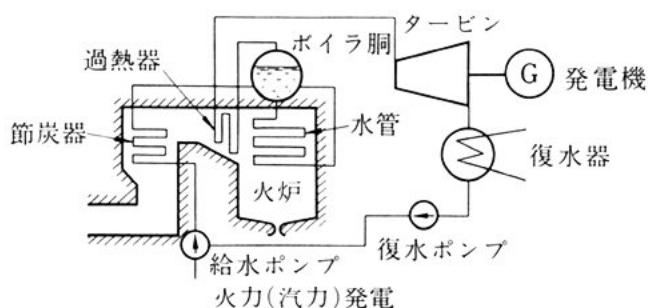



図 16

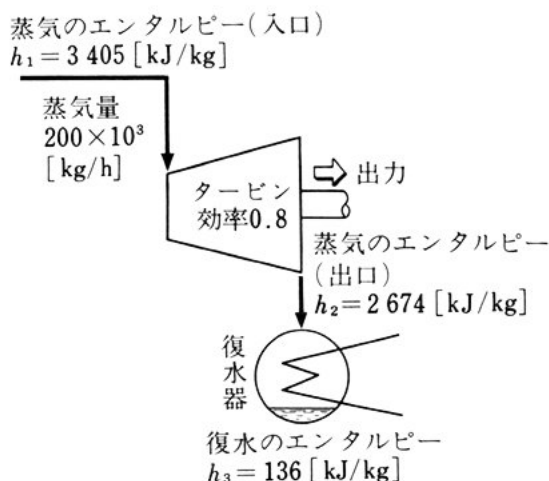



図 17

3．図 17 は，タービン入口および出口における蒸気の状態を示す。この蒸気が，タービンに与えるエネルギーは 1 [kg] 当たり何キロワット時になるか。

4．前問および図 17 で，蒸気タービンの有効効率 0.8，使用蒸気量 200 [t/h]，復水のエンタルピー 136 [kJ/kg] のとき，タービンの出力と熱効率はいくらか。

5．最大出力 350 [MW] の火力発電所で，1 日の平均送電電力が最大出力の 85 [%] であった。10 日間における重油消費量を 1.6×10^4 [kl] とすると，発電所の熱効率はいくらか。ただし，重油の発熱量は 41 860 [kJ/l] とする。

4 原子力発電

この節の目標　火力発電所における燃料として石炭・石油は，我が国ではそのほとんどを輸入にたよっている。そこで，燃料などエネルギー資源の多様化を図るためにも，原子力を利用する原子力発電所は重要である。

また，原子力発電は，火力発電と比べて経済的に見劣りのしないものとなった。電力需要の増加とともに，原子力発電の規模は，しだいに大きくなるものと考えられている。

ここでは，原子力のあらましを学び，それを動力に変換するまでの設備と機能について調べる。

1. 原子エネルギー

（1） 原　子　核

原子核は，正電荷をもった陽子と，電荷をもたない中性子とからできている。陽子と中性子を総称して**核子**という。

原子核の中にある陽子の数がその原子の**原子番号**（atomic number）で，陽子と中性子の数の和すなわち，核子の数が**質量数**（mass number）である。各原子は，原子番号と質量数によって特徴づけられるので，特定の原子または原子核を表す場合，原子記号の左上に質量数を，左下に原子番号をつけて，例えば，次のように表す。

原子番号 2，質量数 4 のヘリウム原子　$^{4}_{2}He$

原子番号 92，質量数 235 のウラン原子　$^{235}_{92}U$

しかし，原子番号は記述を省略することがある。

⊕ 陽 子 1.0073 [u]

○ 中性子 1.0087 [u]

水素 $^{1}_{1}$Hの原子核 1.0073 [u]

重水素 $^{2}_{1}$Hの原子核 2.0136 [u]

ヘリウム $^{4}_{2}$Heの原子核 4.0015 [u]

リチウム $^{7}_{3}$Liの原子核 7.0144 [u]

図 1 原子核の構造と質量

原子の化学性的性質は，陽子の数すなわち原子番号だけで決まる。化学的性質が同じでも，中性子の数が増減して質量数が変わると，それに伴って物理的性質が変わる。このような原子番号が同じで，質量数が違う原子または原子核を互いに**同位体**(isotope)という。

図1に示すように，陽子と中性子の質量はほぼ等しく，それぞれ 1.0073 [u]，1.0087 [u] である。u は**原子質量単位**の単位記号で，炭素 $^{12}_{6}$Cの原子1個の質量を基準とし，その $\frac{1}{12}$ が 1 [u] と決められており，1 [u] $=1.66\times10^{-27}$ [kg]* である。

（2） 原子核の結合エネルギー

一般に，原子核の質量は，それを構成する核子の質量の和よりいくらか小さい。

例えば，ヘリウム $^{4}_{2}$He の原子核は，2個の陽子と2個の中性子からできており，それらの核子の質量の和は，次のようになる。

$$(1.0073\times2+1.0087\times2)\ [\mathrm{u}]=4.0320\ [\mathrm{u}]$$

しかし，ヘリウム原子核の質量は 4.0015 [u] であり，核子の質量より 0.0305 [u] だけ小さい（図2）。この差を**質量欠損**という。このような事実は他の原子にもある。

* より詳しい値は，1 [u] $=1.6605402\times10^{-27}$ [kg] である。

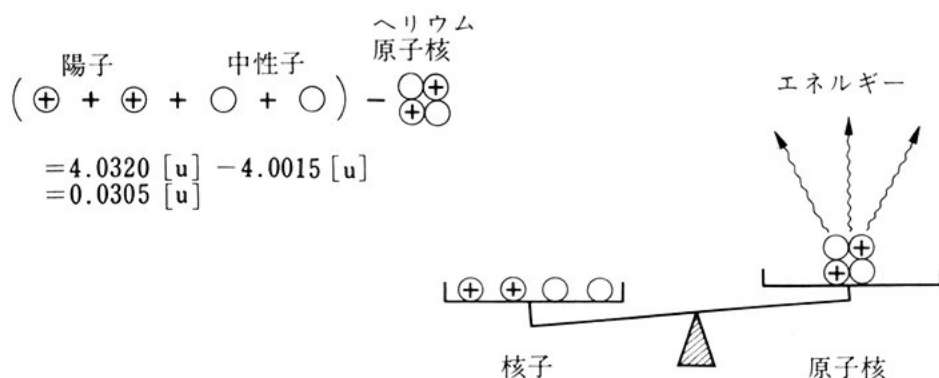



図 2　ヘリウム原子核の質量欠損

このことは，質量保存の法則と矛盾するようであるが，アインシュタインの理論によれば，質量とエネルギーは等価なものであって，この質量欠損に相当するエネルギーが，ヘリウム原子核として，中性子と陽子とを結合させているものと説明される。逆に，ヘリウム原子核を陽子と中性子にばらばらに分けてしまうには，これだけのエネルギーを外から加える必要がある。このようなエネルギーを**結合エネルギー**という。

いま，質量 m [u] に相当するエネルギー U を求めると，次のようになる。ただし，c は真空中の光の速さで，3×10^8 [m/s] である。

$$U = mc^2$$
$$= 1.66\times10^{-27}\times m\,[\mathrm{kg}]\times(3\times10^8\,[\mathrm{m/s}])^2$$
$$= 1.49m\times10^{-10}\,[\mathrm{J}] = \frac{1.49m\times10^{-10}}{1.60\times10^{-13}} \doteqdot 931m\,[\mathrm{MeV}] \qquad (1)$$

eV（**電子ボルト**）は，微小のエネルギーを表すときの単位で，次の関係がある。

$$1\,[\mathrm{eV}] = 10^{-6}\,[\mathrm{MeV}] = 1.60\times10^{-19}\,[\mathrm{J}]^{*} \qquad (2)$$

ヘリウム原子核の質量欠損は 0.0305 [u] であるから，核子 1 個当

* より詳しい値は，1 [eV] $=1.60217733\times10^{-19}$ [J] である。

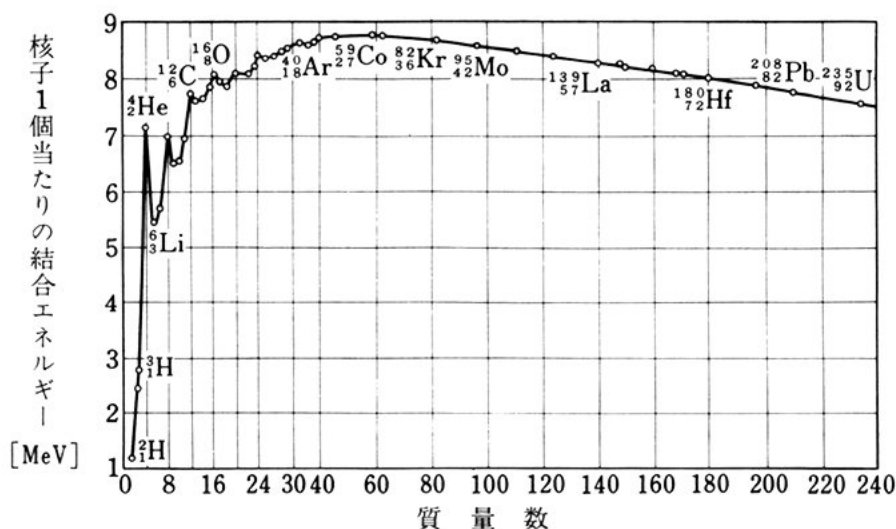



図 3　核子1個当たりの結合エネルギー

たりの結合エネルギーは，931×0.0305 [MeV] $\div 4 \fallingdotseq 7.1$ [MeV] になる。

このような，核子1個当たりの結合エネルギーを，各種の原子核について調べると，図3のようになる。

(3)　核分裂エネルギー

ウラン $^{235}_{92}$U の原子核に中性子 $^{1}_{0}$n を当てると，次の式のように，他の2種類の原子核に分裂し，同時に，2〜3個の中性子ができる。

このように質量数の大きい原子核が，中性子を吸収して不安定になり，同じ程度の大きさの原子核に分裂する現象を**核分裂**という。その際，結合エネルギーの差に相当する多量のエネルギーが放出される。これを**核分裂エネルギー**という。

核分裂によってできる核分裂生成物の種類は，確率的に定まるもので，その質量数と生成率の関係は，図4のようになる。例えば，$^{235}_{92}$U を核分裂させると，約7 [%] の確率で $^{95}_{42}$Mo と $^{139}_{57}$La ができ，さらに2個の中性子が生じる。この反応は次のように表される。

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{95}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{139}_{57}\mathrm{La} + 2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad (3)$$

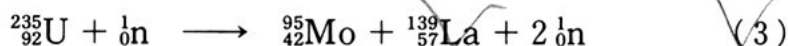
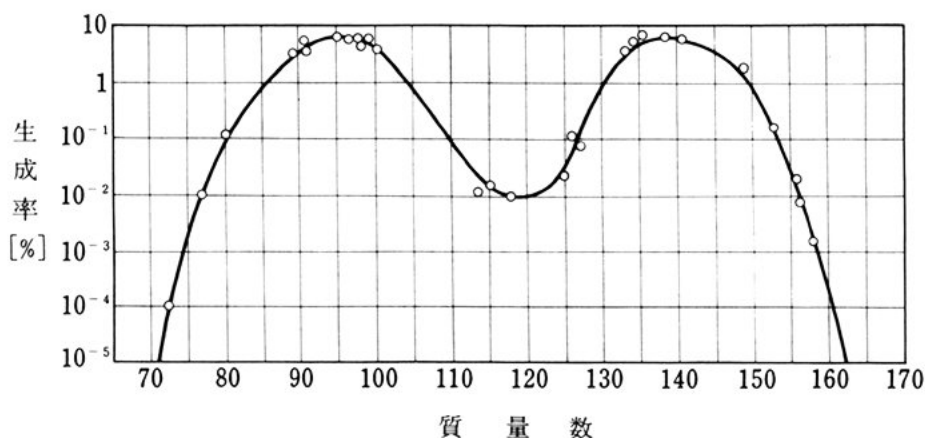



図 4　核分裂生成物の生成率

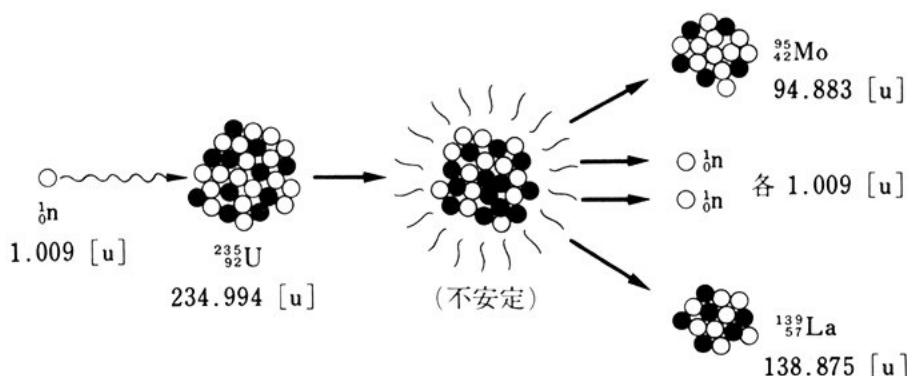
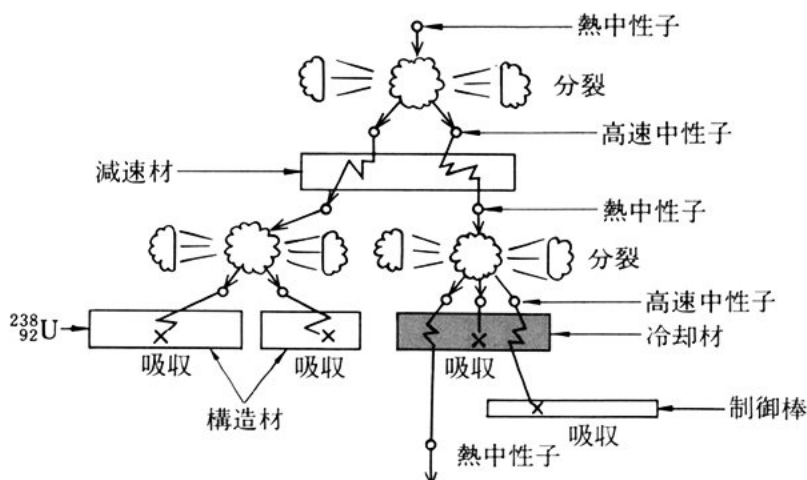



図 5　ウランの核分裂

このときの質量の減少は，図5からもわかるように，0.227 [u] である。これは，$^{235}_{92}U$ 1個当たり約200 [MeV] のエネルギーに相当する。このエネルギーは，化学反応の際に得られるエネルギーとは比べものにならないほど大きい。例えば，炭素が燃える場合，つまり，$C+O_2 \longrightarrow CO_2$ の反応で発生するエネルギーは，炭素原子1個当たりおよそ4 [eV] であるから，その5千万倍である。

（4）連鎖反応

$^{235}_{92}U$ が核分裂してできる中性子は，平均2 [MeV] 程度のエネルギーをもち，非常に速い速度で運動する。この**高速中性子** (fast neu-

図 6　原子炉の中の連鎖反応

tron)は，$^{235}_{92}$U の原子核に吸収されにくいので核分裂反応を起こしにくい。しかし，高速中性子が減速され，低速の**熱中性子**（thermal neutron）になると，$^{235}_{92}$U の原子核に吸収されやすく，核分裂反応を起こしやすくなる。

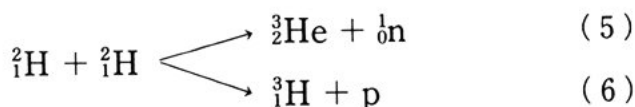
原子炉には，高速中性子を減速させる働きのある水などの減速材や，燃料を封入しておくための構造材や，余分な中性子を吸収して核分裂反応を制御する制御棒とよばれるものが用いられている。

図6のように，1個の熱中性子が，核燃料の原子核に吸収されて核分裂を起こし，その結果発生した高速中性子のうち，少なくとも1個が，減速されて熱中性子になり，次の核燃料の原子核に吸収される。同様の核分裂反応を起こせば，核分裂反応は連鎖的に持続される。この現象を**連鎖反応**という。

（5）　核融合エネルギー

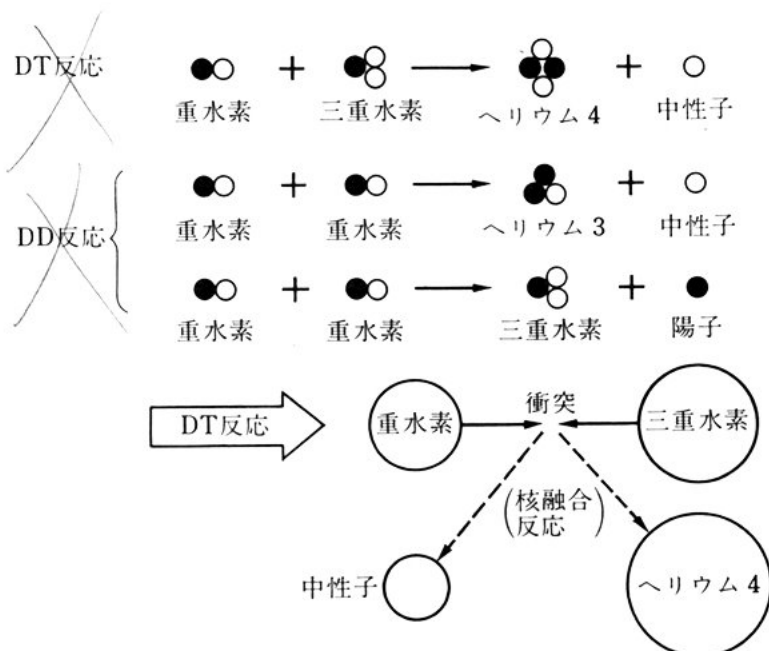
二つの軽い原子核が衝突して融合し，一つの重い原子核になる反応を**核融合反応**という。重要な核融合反応に，次の二つがある。

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad (4)$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \begin{cases} \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n & (5) \\ \rightarrow ^{3}_{1}H + p & (6) \end{cases}$$

ここで，$^{2}_{1}H$ は**重水素**（deuterium），$^{3}_{1}H$ は**三重水素**（tritium）の原子核で，p は陽子である。式（4）の反応を **DT 反応**といい，式（5），（6）の反応を **DD 反応**という。DD 反応では，ほぼ 50［%］の確率で式（5）または式（6）の反応が起こる。$^{1}_{0}n$, p, $^{2}_{1}H$, $^{3}_{1}H$, $^{3}_{2}He$, $^{4}_{2}He$ の質量から計算すると，式（4）の場合には，約 17.6［MeV］，式（5）の場合には約 3.3［MeV］，式（6）の場合には約 4.0［MeV］のエネルギーが放出されることになる。このエネルギーを**核融合エネルギー**という。

核分裂や核融合などのように，原子核を構成する陽子・中性子の結合状態の変化に伴って放出される核分裂エネルギーや核融合エネルギーのことを**原子核エネルギー**という。

核融合反応が起こるためには，図 7 に示すように，二つの原子核

図 7　核融合反応のしくみ

がいきおいよく衝突することが必要である。ところが，原子核は正の電荷をもっているので，二つの原子核が互いに接近すると静電的な反発力が働くため衝突できず，反応は起こらない。この反発力に打ち勝って反応を起こさせるには，それぞれの原子核に高い運動エネルギーを与えて，高速度にして衝突させればよい。このために，燃料気体(重水素・三重水素)を1～2億度の超高温に加熱し，原子核にじゅうぶんな運動エネルギーを与えると，分子はすべて分解し，電子とイオン(原子核)の集合体になる。このような状態にある電離気体のことを**プラズマ**(plasma)とよび，こうして起こる核融合反応を**熱核融合反応**という。この反応によって生じる核融合エネルギーをエネルギー源とする原子力発電は，**核融合発電**とよばれるが，各国で研究されているのが現状で，まだ実証されていない。

2. 原子力発電

(1) 原子炉の構造

核分裂により発生したエネルギーを，熱エネルギーとして利用できるようにする装置が**原子炉**である。核分裂反応を起こさせるために，熱中性子を用いる原子炉を**熱中性子炉**，高速中性子を用いる原子炉を**高速中性子炉**という。

アメリカ合衆国で開発された軽水炉，イギリスで開発されたガス炉，我が国で現在開発している新型転換炉などは，すべて熱中性子炉である。

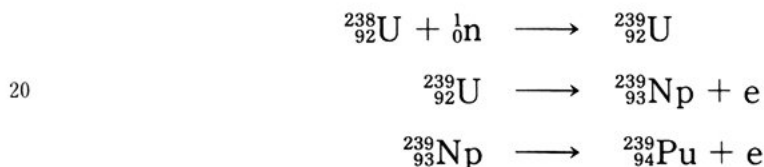
高速中性子炉は，発電用熱出力を発生すると同時に，ウランの燃焼によって消費される核分裂性物質よりも多くの新しい核分裂性物質を生産することができるので，最も有望な原子炉である。世界各

国で実用化の研究が進められ，我が国では実験用の高速中性子炉が運転されているが，発電用原子炉としては，まだ使用されていない。

核燃料　^{235}U や ^{239}Pu のように，核分裂を起こし，連鎖反応を持続できる物質を**核分裂性物質**，^{238}U や ^{232}Th のように，中性子を吸収して核分裂性物質になる物質を**親物質**という。天然ウランの中に含まれる ^{235}U は 0.7 [%] 程度で，残りはほとんど核分裂を起こさない ^{238}U である。

熱中性子炉では，通常天然ウランを**濃縮**して ^{235}U の含有率を 2～4 [%] に高めた**低濃縮ウラン**を UO_2 の形態にし，核燃料として使用することが多い。**天然ウラン**は，主として質量数が 235 と 238 の同位体の混合体であるが，これら同位体の化学的性質は同じであるから，化学的手法で濃縮することは困難である。濃縮工場では，同位体の速度の違いによって分離するガス拡散法が用いられているが，同位体の質量の違いによって分離する遠心分離法も開発が進められている。

原子炉の中では，原子核が中性子 $^{1}_{0}n$ を吸収したり，電子 e を放出したりして他の原子核に変わる反応が行われている。^{238}U は，次の反応式によって ^{239}Pu に転換される。

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow ^{239}_{92}U$$
$$^{239}_{92}U \longrightarrow ^{239}_{93}Np + e$$
$$^{239}_{93}Np \longrightarrow ^{239}_{94}Pu + e$$

このようにしてできた ^{239}Pu は，主としてあと (72 ページ) で学ぶ高速中性子炉や新型転換炉の核燃料として使用される。^{239}Pu は天然には存在しない。

減速材　高速中性子を熱中性子に減速するためには，減速材が使用される。減速材としては，減速効果が大きく，中性子吸収の小

さい物質がよい。通常，軽水・重水・黒鉛・ベリリウムなどが用いられる。**軽水**とは通常の水のことであり，**重水**とは軽水の水素原子を重水素原子と置き換えたものである。

冷却材　炉心で発生した熱エネルギーを外部へ取り出すため，冷却材が使用される。冷却材としては，熱伝達特性がよく，中性子吸収が小さく，放射線に対して安定な物質がよい。軽水・重水・炭酸ガス・ヘリウムガス・液体ナトリウムなどが用いられる。

反射体　反射体は，中性子が炉心から漏れるのを防ぐためのもので，炉心のまわりを囲んでいる。反射材としては，減速材と同じように，軽水・重水・黒鉛・ベリリウムなどが用いられる。

制御棒　制御棒は，原子炉内の中性子を吸収して，中性子が核燃料に吸収される割合を制御するためのものである。制御材としては，中性子の吸収の大きい物質すなわち，カドミウム・ほう素・ハフニウム，またこれらの合金などの材料を棒状にして用いる。

核分裂反応によって放出される中性子のうち，平均として1個だけが，次の核分裂を起こすとすれば，連鎖反応において核分裂反応の起こる割合は，増加も減少もしないで，一定の割合で持続される。このような状態を**臨界状態**という。制御棒を炉心部に出し入れすることにより，連鎖反応を定められた臨界状態に保つように制御することができる。

生体しゃへい　生体しゃへいは，炉心から出るγ線(電磁波)などの人体に有害な放射線の量を，人体に対して許容できる程度まで減らすことを目的とするしゃへい壁であり，特殊な厚いコンクリート，水・鉛などが用いられる。

(2)　原子力発電所で用いられる原子炉

原子力発電所では，原子炉の中で発生した熱を冷却材で外部へ取

り出し，この熱で給水を蒸気にして，タービンを回転させる。したがって，火力発電所と異なる点は，熱の発生および蒸気の作り方だけで，熱エネルギーにより高温・高圧の蒸気を発生したあとは，火力発電所とまったく同じである。

5　**(a)　軽水炉**

低濃縮ウランを核燃料とし，冷却材と減速材に軽水を用いた原子炉を**軽水炉**という。軽水炉には，蒸気を原子炉の中で直接生産するもの（沸騰水型原子炉）と，蒸気発生器と組み合わせてタービンを回す蒸気を作るもの（加圧水型原子炉）とがある。

10　**沸騰水型原子炉**（boiling water reactor : **BWR**）　図8は沸騰水型原子炉の燃料集合体である。低濃縮ウランのUO_2を高温で焼き固めたペレットをジルコニウム合金の中に封入し，燃料棒とする。これを64本束ねて燃料集合体とし，ハフニウム・ほう素鋼による1本の制御棒を4本の集合体で囲み，これを単位として約750本の集合

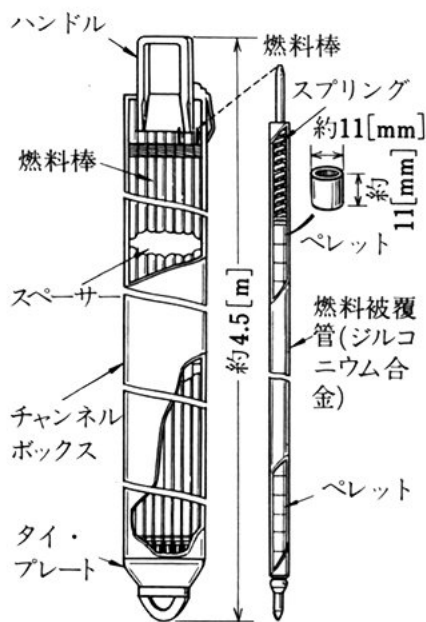



図 8　BWRの燃料棒（右）**と燃料集合体**（左）

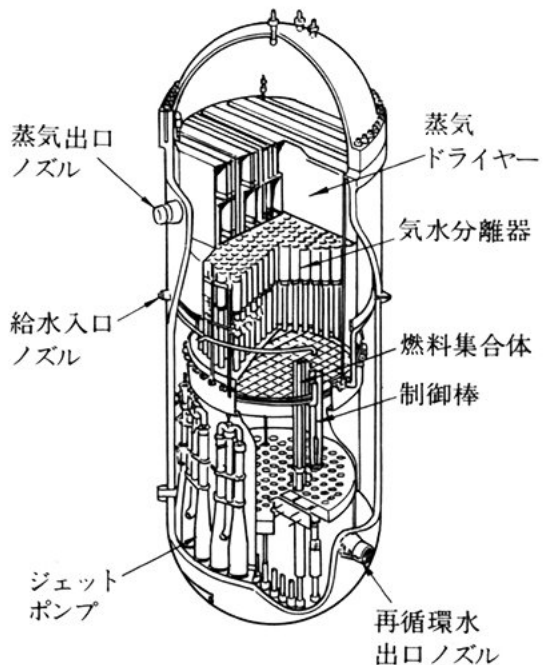



図 9　原子炉炉心と圧力容器

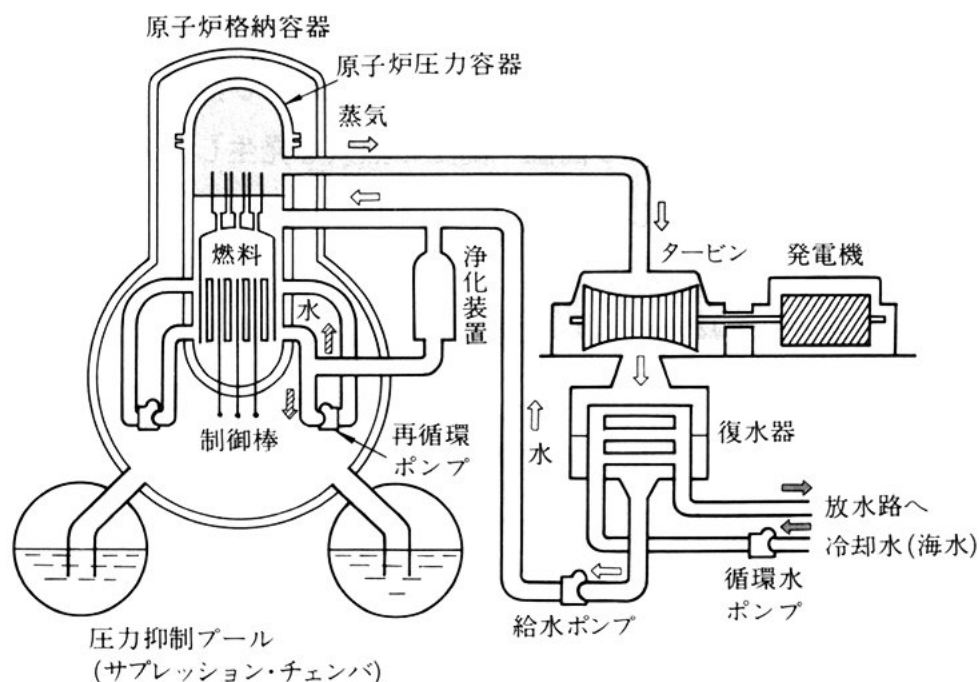



図 10　沸騰水型原子炉

体を集めると円筒状の炉心が形成される。

図 9 は原子炉圧力容器に収納された炉心である。冷却水は給水入口ノズルから入り，炉心底部から加熱されて頂部に出るときに約 6.9 [MPa]（約 70 [kgf/cm²]）の蒸気となり，タービンに導かれる。

図 10 は沸騰水型原子炉の原理図である。軽水は原子炉中で沸騰し蒸発する。この蒸気を直接タービンへ送り発電する。福島第一，福島第二，東海第二，女川(おながわ)，浜岡，島根，柏崎(かしわざき)の原子力発電所は，この型式のものである。

加圧水型原子炉（pressurized water reactor : **PWR**）　図 11 は，加圧水型原子炉の原理図である。

炉心で加熱された冷却材をより高温にするために，炉心を丈夫な圧力容器に入れ，加圧器によって高圧が保たれるようにしてある。

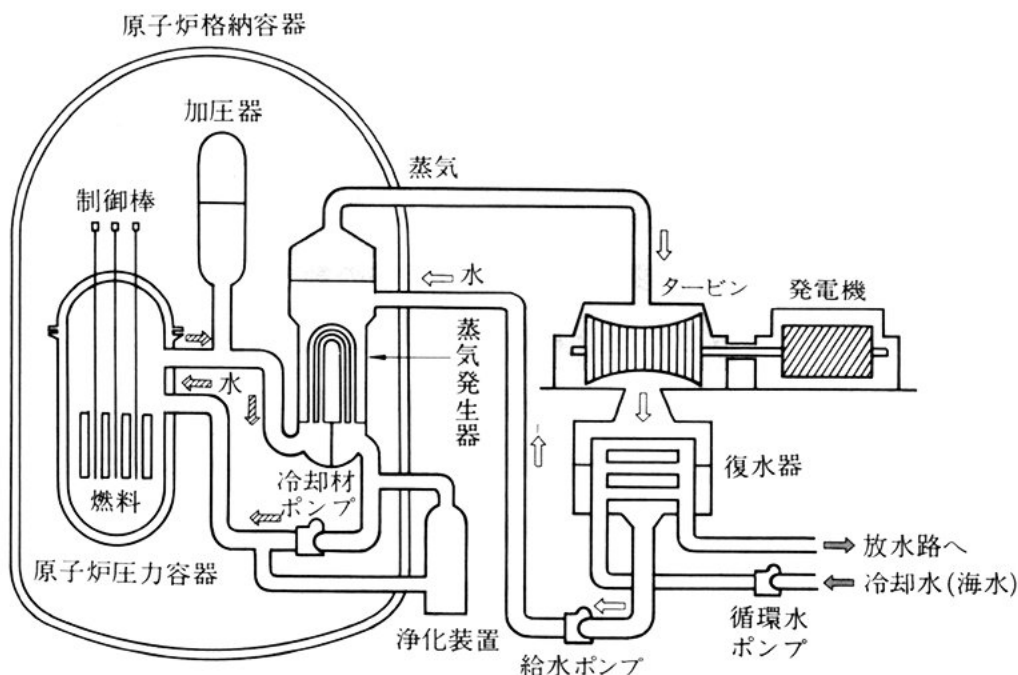



図 11　加圧水型原子炉

燃料集合体は，沸騰水型原子炉と同じように，低濃縮ウランの UO_2 でペレットをジルコニウム合金の薄肉パイプに封入した燃料棒から作られている。美浜(みはま)，高浜，大飯(おおい)，伊方(いかた)，玄海，川内(せんだい)の原子力発電所は，この型式のものである。

いずれの型式でも，軽水炉では，ウランの核分裂によって生じる放射性物質を閉じ込めるために，燃料は陶器のようなペレットとし，ジルコニウム合金のパイプに封入し，圧力容器・格納容器，厚いコンクリートの建屋で囲っている。

核燃料には，低濃縮ウランの UO_2 を高温で焼き固めたペレットとよばれるものをステンレス鋼管またはジルカロイ合金被覆に収めた燃料棒が用いられる。制御棒には，ハフニウム・ほう素鋼または Ag-In-Cd 合金が用いられる。

(b)　これからの発電用原子炉

^{239}Pu は熱中性子・高速中性子いずれによっても核分裂を起こす。この ^{239}Pu を核燃料とする原子炉がこれから有望なものとして，我が国でも研究されている。

原子炉中で生成された核燃料 $^{239}_{94}$Pu の原子の数と，消費された核燃料 $^{239}_{94}$Pu の原子の数との比を **転換率** といい，現在実用されている軽水炉では 0.5～0.6 程度，これを高めて 0.8 程度にしたものを新型転換炉，1 より大きくしたものを高速増殖炉とよんでいる。なお，1 以上の場合は転換率といわずに，**増殖率**という。

新型転換炉（advanced thermal reactor : **ATR**）　減速材には重水を用い，冷却材には軽水を沸騰させて用いる。蒸気は直接タービンへ送られる。BWR と同様に，熱交換器を必要としない。

核燃料には，PuO_2 または，UO_2 を用いる。この場合 ^{239}Pu は，^{235}U が熱中性子で分裂したと同様に，熱中性子によって分裂を起こす。減速材に中性子吸収の少ない重水を用いているため，炉内で ^{238}U から ^{239}Pu への転換率が大きい。使用済み燃料から，この ^{239}Pu を取り出し，それと天然ウランを混ぜるだけで，次の新しい核燃料を作り出せるので，核燃料資源を有効に利用することができる。

高速増殖炉（fast breeder reactor : **FBR**）　核分裂連鎖反応が主として高速中性子で起こされるもので，熱中性子炉とは，いろいろな面で異なっている。その大きな点は，減速材が不要なこと，核燃料として PuO_2 が使用されること，原子炉の体積に比べて大きな出力となることである。そのため，液体ナトリウムは，中性子吸収が小さく，また熱伝導率が大きく粘性が小さいので，よい冷却材として用いられる。図 12 は，高速増殖炉の原理図である。

この原子炉は，連鎖反応を維持するために必要とされる以外の中

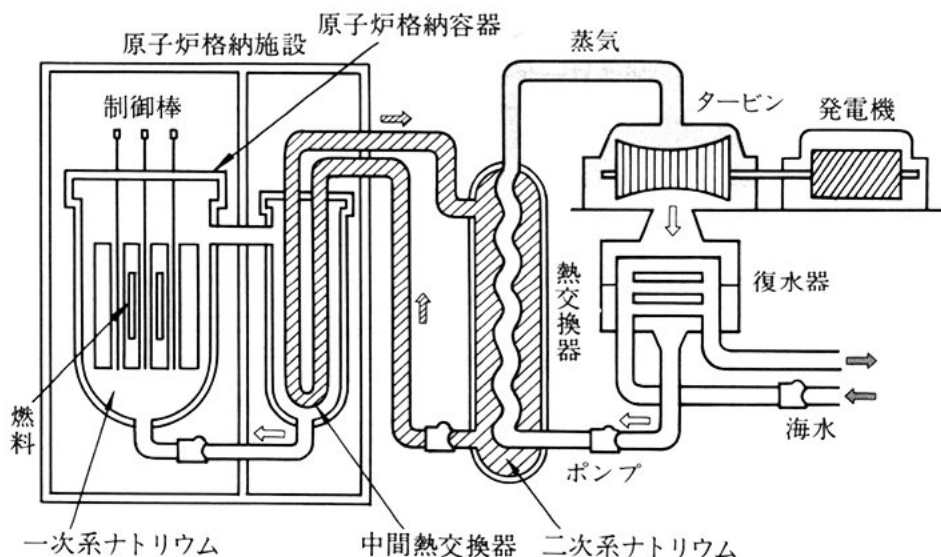



図 12 高速増殖炉

性子を親物質 ^{238}U に吸収させて，新しい核分裂性物質 ^{239}Pu を増殖させるように作られている。

炉心部の燃料棒（PuO_2）の周囲に，親物質 ^{238}U からできているブランケットを置いて，増殖率が大きくなるようにしている。ブランケットは，使用済み燃料から取り出したウランなど，天然ウランよりも ^{238}U の割合が多いもの（**減損ウラン**）を燃料棒状に作ったものである。これは核燃料資源の利用に最も有効であるので，将来の発電用原子炉として注目されている。

（3） 核燃料資源と原子力発電の安全性

（a） 核燃料サイクルと核燃料資源

核燃料の製造，新燃料の原子炉への装荷，原子炉の運転に伴う核燃料の燃焼，燃焼した核燃料と新燃料の交換，使用済み燃料の再処理・再使用など，核燃料の使用循環過程を総称して**核燃料サイクル**という。核燃料サイクルは，核燃料資源の利用効率，発電価格に大きな影響を与える。地球のウラン埋蔵量は有限であるため，核燃料の

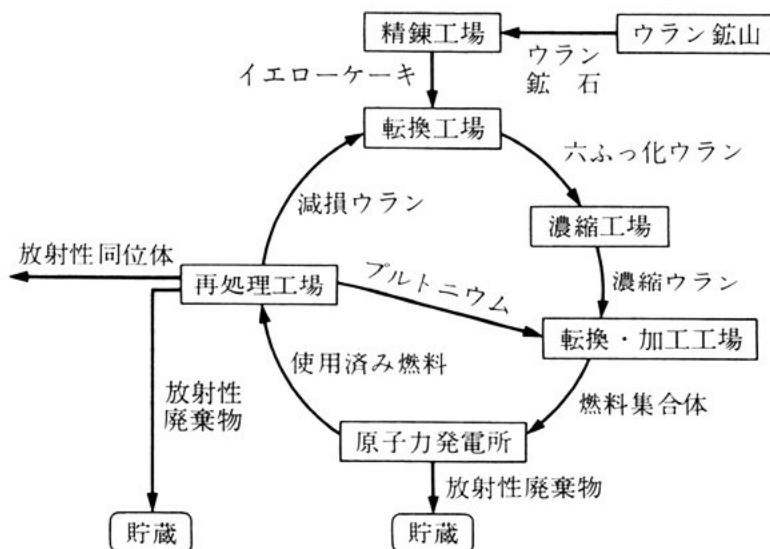



図 13　核燃料サイクル

利用効率を向上させることが必要である。そのため，新型転換炉や高速増殖炉など優れた性能の原子炉を開発すること，長い間燃焼させることのできる燃料棒を製造・加工すること，多くの核燃料を燃焼させることのできる運転制御法・燃料交換法を採用することなどが，核燃料を有効に利用するうえで重要である。

図 13 に，核燃料サイクルのあらましを示す。

(b)　原子力発電における安全性

原子力発電の特有の問題は，原子炉中の核燃料がもっている潜在エネルギーが非常に大きいこと，炉内に多くの放射性物質が蓄積されていることである。なんらかの原因で，核分裂が増大し，温度が上昇すると，^{235}U の核分裂の割合が増し，同時に^{238}U の中性子吸収の割合も増す。核燃料には，^{235}U に比べて，核分裂を起こさない ^{238}U の方が非常に多いため，中性子の多くが ^{238}U に吸収され，結果として核分裂の割合が減少する。このような自然のもつ自己制御性のために，この潜在エネルギーが一時に放出されるということはないが，

放射性物質が外部に放出されることは絶対に許されない。そのためには，平常運転時においても，原子炉の故障や放射線漏れを起こさないように，つねに監視・確認をしておかなくてはならない。

原子炉を設計するときに想定する大きな事故としては，誤って制御棒を急速に引き抜いたときに起こる原子炉出力の急上昇，原子力発電所の冷却材配管が一瞬に破断し，冷却材が冷却系統外に流出し，原子炉の核燃料が溶融する冷却材喪失事故などが考えられている。

これらの想定事故に対処するため，次のような装置が設けられている。

1） 主配管が切断され圧力容器の圧力が下がり冷却水が急激に減る場合，用意された中性子吸収効果のよいほう酸を含んだ加圧された水が炉心を冷却する。これが非常用炉心冷却装置である。

2） 炉心にある高温・高圧の冷却水が，ふつうの圧力格納容器内にあふれ出る場合，その冷却水が急激に蒸発して格納容器内の圧力を上昇させるので，圧力上昇を抑えるために水を噴霧する装置がある。

3） 放射性気体が漏れる場合，周囲に拡散しないように，フィルタの装置がある。

（c） 使用済み燃料の処理

使用済み燃料は，まず水中に数か月から1年にわたって発電所の中に保管し，放射能や崩壊熱をじゅうぶん減衰させた後，有効利用できる ^{239}Pu などの物質を分裂生成物から分離する。このことを**再処理**という。再処理後の分裂生成物は，原子力施設でも再利用できないので，放射線をしゃへいする鉛やコンクリートで幾重にも包んで保管している。

問　　題

1. 減速材を用いる目的は何か。また，減速材にはどんなものがあるか。

2. 次の事項について調べよ。

核燃料　　反射材　　しゃへい材　　制御棒　　冷却材

3. 質量がエネルギーになり，エネルギーはまた質量に変換されることを，例を挙げて説明せよ。

4. 核子1個当たりの結合エネルギーが大きい原子核ほど安定である。そのことから，62ページ図3を参考にして，核分裂エネルギー・核融合エネルギーを説明せよ。

5. 連鎖反応について説明せよ。また，臨界状態とはどんなことか。

6. 図14(a),(b)は，それぞれ火力発電・原子力発電の系統図である。熱の発生部分，蒸気発生部分，蒸気使用部分，発電部分について，その相違点と類似点を述べよ。

(a) 火力発電　　(b) 原子力発電

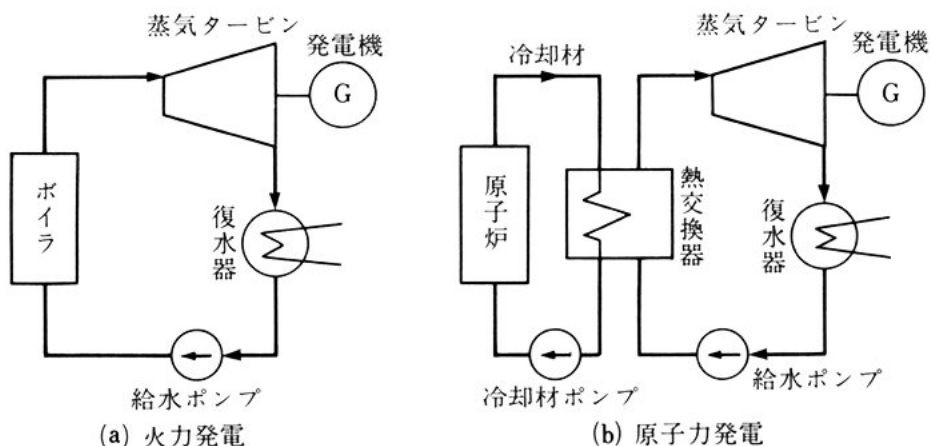
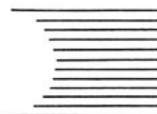
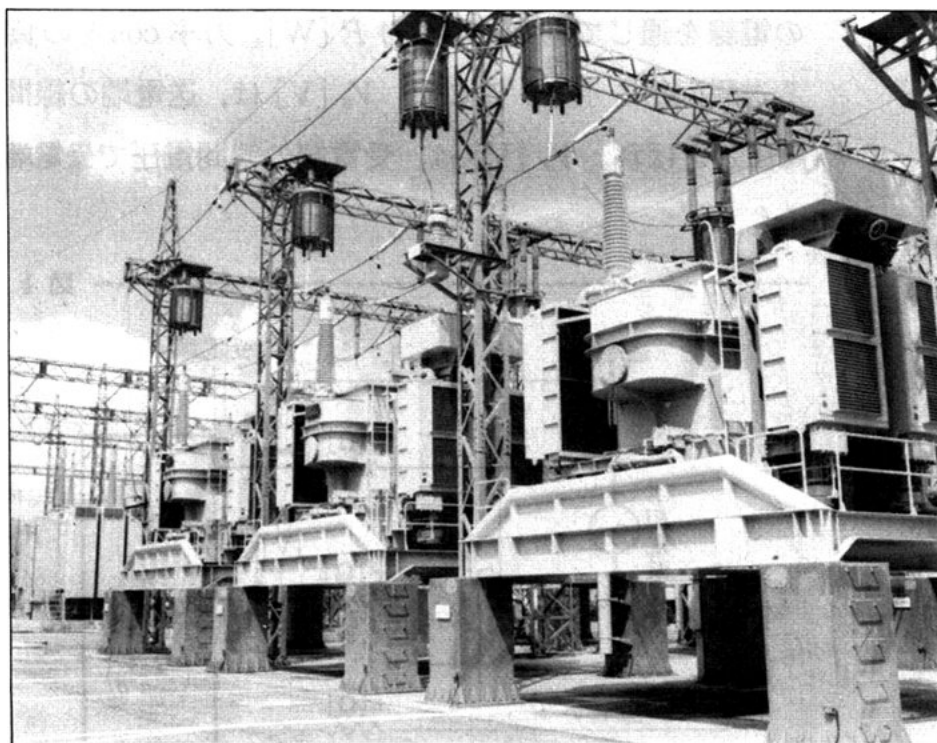



図 14

第9章

送　電

発電所で発生した電力は，送電線路によって都市や工場などの需要地まで送られる。この場合，電線路での電力損失が少ないこと，電圧変動が小さいこと，電線路の一部に事故が発生しても，停電が少なく送電できることが必要である。

この章では，送電方式，送電線路，送電の運用について調べる。

サイリスタ周波数変換装置　新信濃変電所の周波数変換設備

1 送電方式

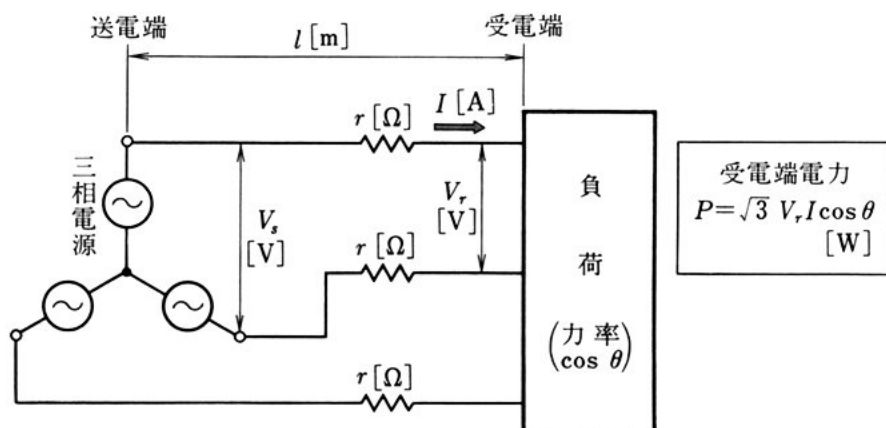
この節の目標　送電は，電気エネルギーの輸送を目的とするものであるから，輸送途中におけるエネルギー損失を少なくする工夫がなされ，そのための電気方式がいろいろ考えられている。

また，膨大なエネルギーを安定に，しかも安全に供給する方法が考えられなくてはならない。ここでは，このような送電方式について学ぶ。

1. 送電のしかた

(1) 送電電圧

送電電圧の決め方　図1は，三相交流電源から，抵抗が r [Ω] の電線を通じて，受電端電力 P [W]，力率 $\cos\theta$ の負荷へ電力を送る送電回路を示す。ここで，V_s [V] は，送電端の線間電圧で**送電端電圧**とよばれ，V_r [V] は，受電端の線間電圧で**受電端電圧**とよばれる。

図1 送電回路

この場合，$P=\sqrt{3}\,V_rI\cos\theta$ [W] であるから，$I=\dfrac{P}{\sqrt{3}\,V_r\cos\theta}$ [A] となり，電線の抵抗損 P_l [W] は，次の式で表される。

$$P_l=3rI^2=3r\left(\frac{P}{\sqrt{3}\,V_r\cos\theta}\right)^2=\frac{rP^2}{V_r{}^2\cos^2\theta} \qquad (1)$$

ここで，$P+P_l$ は送電端電力であり，これと受電端電力とを総称して**送電電力**という。また，$p=\dfrac{P_l}{P}$ を**送電損失率**，$\dfrac{P}{P+P_l}$ を**送電効率**という。

式（1）からわかるように，一定の距離 l [m] に，一定の電力 P を送る場合は，電線の抵抗損 P_l は，受電端電圧 V_r の 2 乗に反比例する。したがって，電線路の電力損失を少なくして，効率よく送電するためには，電圧が高いほど電流が小さくなり，電線の断面積も小さくなって有利である。また，電力損失を同一とすると，電線の抵抗は電圧の 2 乗の割合で大きくしてもよいから，電線は細いものでよいことになる。

電線路の電力損失には，**抵抗損**だけでなく，電線路のコロナ放電による**コロナ損**，電線路を大地から絶縁するがいしの**漏れ損**などがある。コロナ損は電圧が高いほど，また細い電線ほど無視できない値となる。漏れ損は，がいしの汚損がはなはだしい場合には無視できなくなる。

送電距離が長く，送電電力が大きな場合には，電力損失をどの程度にするか，電線の直径や絶縁をどうするかなどを検討して，経済的な観点から送電線路の電圧の値を定めている。

例題 1.　三相三線式送電線において受電端電圧 60 [kV]，受電端電力 6000 [kW]，力率 0.8 の送電線の送電損失率・送電効率を求めよ。ただし，電線 1 本の抵抗を 20 [Ω] とする。

解答 抵抗損 $P_l=\frac{(6000\times10^3)^2\times20}{(60\times10^3)^2\times0.8^2}=\frac{6000^2\times20}{60^2\times0.8^2}=313\times10^3\ [\mathrm{W}]$

$=313\ [\mathrm{kW}]$

送電端電力 $P+P_l=6000+313=6313\ [\mathrm{kW}]$

送電損失率 $p=\frac{P_l}{P}=\frac{313}{6000}=0.052$

送電効率 $\frac{P}{P+P_l}=\frac{6000}{6313}=0.95$

問 1. ある送電線路で，電圧を2倍にして同じ送電損失率で送電するとき，送電電力は何倍になるか。

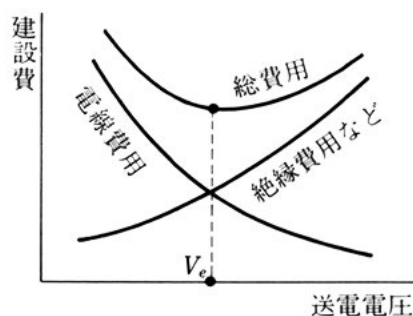
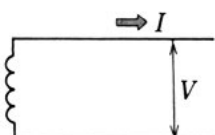
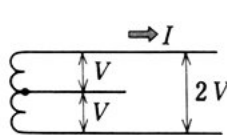
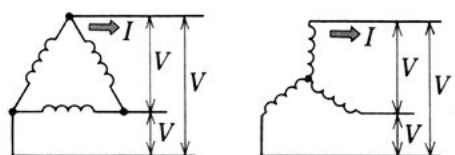
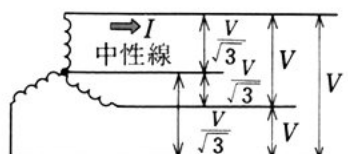
送電電圧と公称電圧　送電を行う電線路の線間電圧を **送電電圧** という。図2は，送電電圧と建設費の関係を示したもので，V_e は建設費が最小となる送電電圧であり，個々の電線路によって異なる。しかし，多くの電線路がそれぞれ最も経済的な送電電圧を採用することは，電圧がまちまちになって不便なので，電線路を代表する電圧を定めておく必要がある。一般に，電線路を代表する線間電圧を，その電線

図 2　送電電圧と建設費

表 1　我が国の標準電圧

公称電圧 [kV] 1000 [V] を超える電線路		公称電圧 [V] 1000 [V] 以下の電線路
3.3	110.0	100
6.6	(154.0	200
11.0	187.0)	100/200
22.0	(220.0	415
33.0	275.0)	
(66.0 77.0)	500.0	240/415

(JEC 158-1970 による)

注. (　) 内の電圧は，同一地域では，どちらか一方の電圧だけを採用する。また，100/200 [V] は単相三線式に，240/415 [V] は三相四線式に採用する。

路の**公称電圧**という。

公称電圧が電線路によってまちまちになると，使用機器の規格が多種・多様になって，生産原価が高くなり，経済的に不利になるばかりでなく，他の系統との連系（86ページ参照）が複雑になる。そのため，我が国では，表1に示す値を標準としている。このような公称電圧の標準となる電圧を**標準電圧**という。

問 2. 標準電圧を決めるのはなぜか。

表 2　交流方式の種類

電気方式	結線図	電線量*	電線1線当たり**	
			送電電力	比較
① 単相二線式		100	$\frac{VI}{2}$	100
② 単相三線式		37.5 31.3***	$\frac{2VI}{3}$	133
③ 三相三線式		75	$\frac{\sqrt{3}VI}{3}$	115
④ 三相四線式	中性線	33.3 29.2***	$\frac{\sqrt{3}VI}{4}$	87

* 送電電圧，送電電力，送電距離，送電線の損失は一定

** 電線量と電線1線当たりの送電電力の比較は力率を100［%］として計算してある。

*** 中性線の断面積が外線の $\frac{1}{2}$ のとき

(2) 電 気 方 式

電力を送る方法すなわち電気方式には，直流で送る直流方式* と交流で送る交流方式がある。交流方式は，変圧器によって効率的に電圧を変えることができるので，送電に広く用いられている。

交流方式には，表2に示すように単相二線式・単相三線式・三相三線式・三相四線式などがあるが，ほとんど三相三線式が採用されている。

三相三線式は，単相二線式に比べて次のような長所がある。

1) 同一の電圧・電力・損失・距離の場合の所要電線質量は，単相二線式の $\dfrac{3}{4}$ である。
2) 同一の電圧・電流の場合の，電線1本当たりの送電電力は，単相二線式の 1.15 倍である。
3) 三相交流から単相交流を取り出すことができる。
4) 回転磁界が容易に得られる。

例題 2． 送電電圧・送電電力・電力損失・送電距離が等しい場合の電線断面積・所要電線質量を，三相三線式と単相二線式について比較せよ。

解答 表2の①，③において，送電電圧を V，送電距離を l とし，三相三線式の電流を I_3，電線1本の抵抗・断面積をそれぞれ r_3，A_3，単相二線式の電流を I_2，電線1本の抵抗・断面積をそれぞれ r_2，A_2 とする。

送電電圧・送電電力・電力損失・送電距離が等しければ，次の式がなりたつ。

---

* 500 [kV] 以上の長距離・大容量の送電やケーブルによる送電は，直流方式が有利である。

送電電力　$VI_2=\sqrt{3}\,VI_3$

ゆえに，$I_2=\sqrt{3}\,I_3$

電力損失　$2I_2^2r_2=3I_3^2r_3$

ゆえに，$r_2=\dfrac{1}{2}r_3$

断面積　$A_2=\dfrac{\rho l}{r_2}$

$A_3=\dfrac{\rho l}{r_3}$

（ただし，ρ は電線の抵抗率）

したがって，三相三線式と単相二線式の電線の断面積比は，次のようになる。

断面積比　$\dfrac{A_3}{A_2}=\dfrac{r_2}{r_3}=\dfrac{1}{2}$

また，三相三線式と単相二線式の所要電線質量をそれぞれ m_3，m_2 とすると，次の式で表される。

所要電線質量　$m_3=3\sigma A_3 l$

$m_2=2\sigma A_2 l$

（ただし，σ は電線の線密度）

したがって，所要電線の質量比は，次のように求められる。

質量比　$\dfrac{m_3}{m_2}=\dfrac{3A_3}{2A_2}=\dfrac{3}{2}\times\dfrac{1}{2}=\dfrac{3}{4}$

2. 送配電系統の構成

(1) 送配電系統図

発電された電力は，発電所から需要場所へ送電される。送電の効率をよくするため，発電所では変圧器によって電圧を高くする。需要場所に近づくと，安全性を考慮して，いくつかの **変電所** (substa-

火力発電所
500～
275[kV]
超高圧変電所
500～
275[kV]
水力発電所
154[kV]
154[kV]
154[kV]
火力発電所
一次変電所
水力発電所
66[kV]
154～66[kV]
154～66[kV]
電鉄用変電所
中間変電所
大工場
66～22[kV]
22[kV]
66～22[kV]
ビルディング
中工場
配電
変電所
大工場
6.6[kV]
200[V]
6.6[kV]
200[V]
200[V]
商店
200/100[V]
小工場
送電線
配電線
農家
住宅

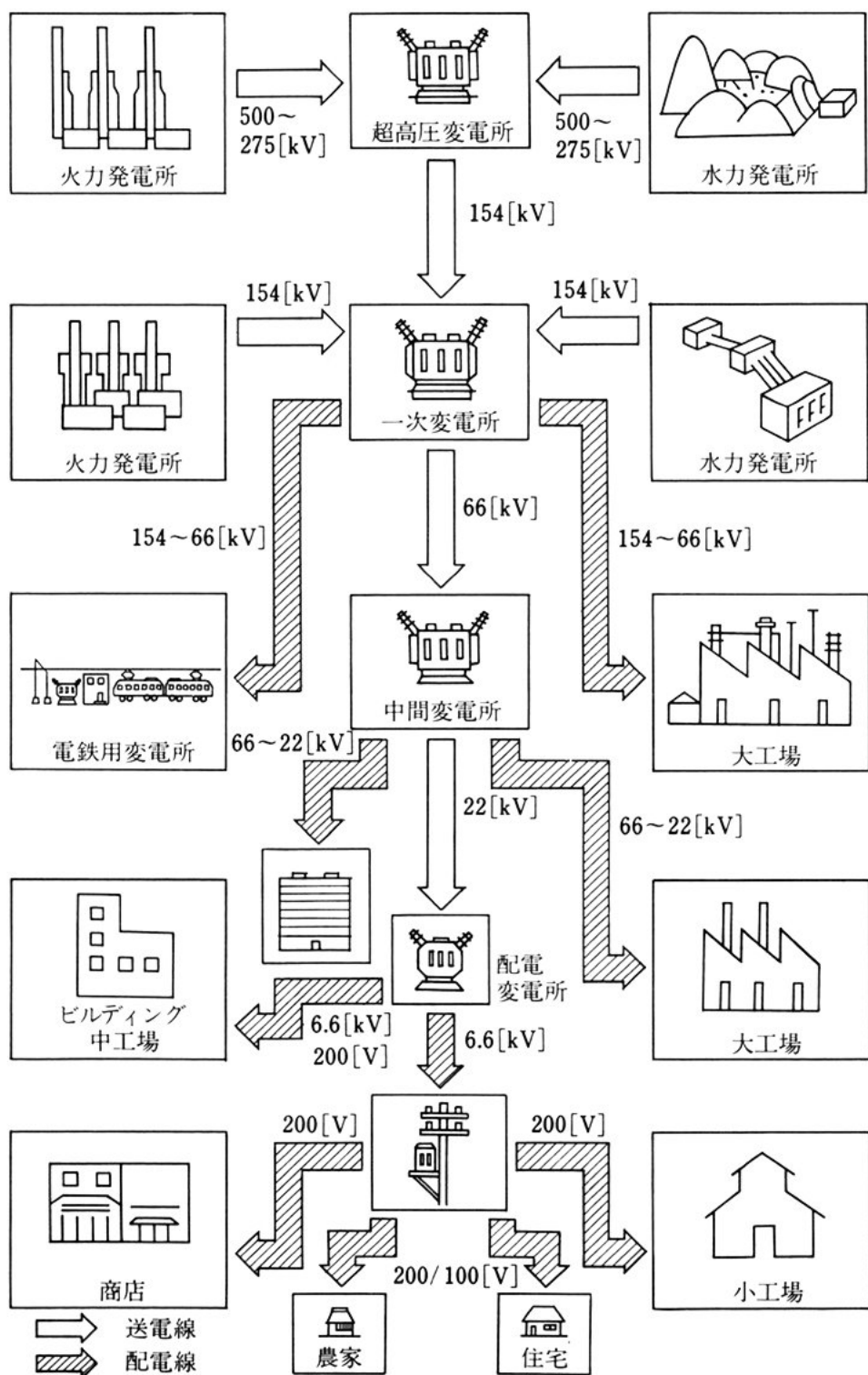



図3 送電と配電

tion) で電圧を段階的に低くして送電する。このようすを図3に示す。

発電所で発電した電力は，275 [kV] の高い電圧 (200 [kV] 以上を**超高圧**という) に昇圧後，電線路によって超高圧変電所へ送られる。電力需要の大きな地域には，このような超高圧変電所を多く設け，これらを環状線で並列に接続している。このことによって，次の利点がある。

1)　ある系統だけに大きな負荷がかかった場合，他の系統からも電力を供給できる。

2)　需要負荷が少ないときは，高効率の発電所だけを運転できる。

3)　主として火力発電所の運転をし，補助的に水力発電所を運転できる。

4)　揚水発電ができる。

このような目的で，各系統を接続（結合）することを**連系**という。275 [kV] の電圧は，154 [kV] に下げて一次変電所へ送られる。一次変電所は，154 [kV] の発電所とともに，いくつかのグループごとに連系して運転されている。

一次変電所では，66 [kV] にして中間変電所へ送り，ここで，22 [kV] に下げて配電変電所へ送る。

このように，発電所相互間，発電所と変電所間，変電所相互間の電線路を**送電線路**とよんでいる。

なお，最近 500 [kV] の環状線や送電線も一部に採用されている。そして，送電距離，電力需要の増大とともに 500 [kV] の採用は，今後ますます多くなるであろう。

配電変電所から送り出される電力は，直接需要家に供給されるが，この電線路を**配電線路**といい，電圧は 22 [kV]，6.6 [kV] が多い。

他の変電所から需要家に送る配電線路もあり，需要設備の大きさによって，それぞれの配電電圧が用いられる。

(2) 広域送電連系

我が国の各電力会社では，それぞれ独自に送電系統を超高圧環状線で連系して，需要電力と供給電力の平衡を保って運転している。

このような各電力会社ごとの系統を，さらに他の電力会社と連系すると，総合的な電力の使い方が拡大されて，より多くの効果を上げることができる。これを**広域送電連系**という。前見返しの図は，我が国の送電系統図のあらましである。

ところで，我が国の商用周波数（前見返し参照）は，富士川以東の 50 [Hz] 地域と，それ以西の 60 [Hz] 地域に分かれている。これは電力使用の初めにドイツとアメリカ合衆国の両方の技術がほぼ同時に導入され，そのまま両方の電力開発が進められたためである。

50 [Hz] 系と 60 [Hz] 系の連系には，50 [Hz] の電力を 60 [Hz] の電力に変える装置と，60 [Hz] の電力を 50 [Hz] の電力に変える装置とが必要である。そのために，これらを一組の装置で行う**周波数変換装置**とよばれる装置が用いられる。

また，設備面での広域運営も行われている。例えば，公害・用地不足，その他の面で受け持ち区域に建設用地が見付からないとき，隣接会社の協力を得て，その地域に発電所を建設したり，資材・技術などの協力を図ったりしている。

問 3. 広域送電連系の実例を調べよ。

問 4. 広域連系の効果を説明せよ。

(3) 商用周波数の統一について

我が国において，50 [Hz]，60 [Hz] の 2 種類の商用周波数が用いられていることは，次のような観点から都合がわるい。

1) 広域送電連系を構成するためには，周波数変換装置が必要である。

2) 巨大な周波数変換装置では，電力損失が少なくなく，省エネルギーという観点から不経済である。

3) 例えば，50 [Hz] 系で使用する機器は，60 [Hz] 系で使うと効率が低下するとか，使用目的に合わないとか，まったく使用できないものもある。

このようなことから，商用周波数を統一する必要があるといわれながら，社会全体としては，巨大な経済的負担を生じるため，実現がむずかしいとされている。

問　　題

1. 受電端電圧 20 [kV]，受電端電力 1000 [kW]，力率 0.8 の単相二線式送電線の送電損失率を求めよ。ただし，電線1本の抵抗を 10 [Ω] とする。

2. 図4で，線間電圧 V_r が 100 [kV]，電流 I が 250 [A] のとき，受電端電力 P [W]，電線の全抵抗損 P_l [W]，送電端電力 $P+P_l$ [W] および，送電損失率 $\dfrac{P_l}{P}$ を求めよ。ただし，抵抗 r は 15 [Ω] とする。

3. 前問および図4で，送電損失率を等しくして受電端電力を4倍にするには，線間電圧 V_r [V] および電流 I [A] は，それぞれいくらにすればよいか。

4. 図5のように，受電端電力 P [W]，線間電圧 V_r [V]，負荷力率 $\cos\theta$，送電距離 l [m]，電線材料（抵抗率 ρ [Ω・m]）および，使用電線総質量 m [kg] を等しくしたとき，単相二線式・三相三線式について電力損失を比較せよ。

5. 我が国における商用周波数分布の地域的な境界のおよそを示し，商

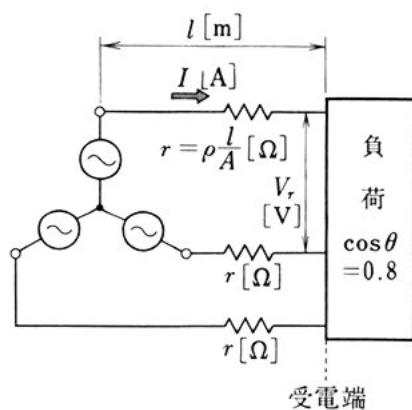
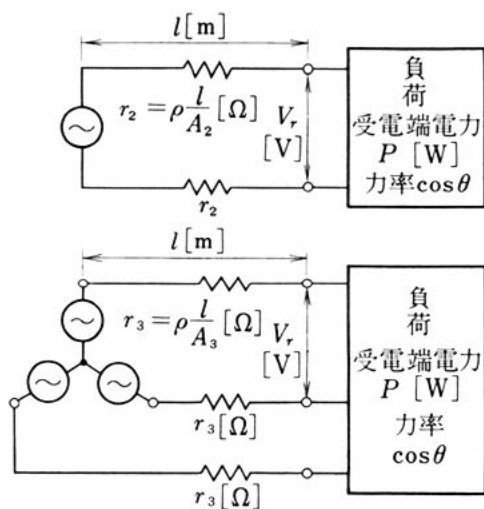



図 4　　　図 5

用周波数の異なることの不便さを検討せよ。

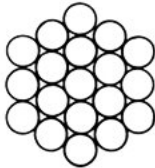
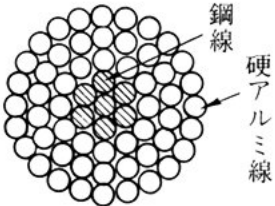
6．公称電圧は，その電線路の受電端電圧のほぼ 10 [%] 高い電圧であるという。公称電圧 110 [kV] の送電線路の受電端電圧はいくらか。

送電線路

この節の目標　電力を輸送する場合，金属導体が用いられるが，これは，大地とじゅうぶんに絶縁する必要がある。

空気は，良質の絶縁物であるが，この絶縁性を利用した送電線路を架空送電線路といい，鉄塔や鉄筋コンクリート柱に取り付けたがいしによって電線を支持している。

また，絶縁紙やポリエチレンもよい絶縁物であるから，導体をこの絶縁材料で被覆し，機械的強さにも耐えるように作られた電力ケーブルを地中に埋設(まいせつ)し，電線路とした地中送電線路がある。

これらは，いずれも経済性，風水害に対する強度・安全性，占有空間，保守点検などの点で，優劣があり，建設時の条件に応じて，それぞれ利用されている。

ここでは，これらの送電線路の構造・構成・電気的特性について調べる。

1. 架空送電線路

(1) 電　　線

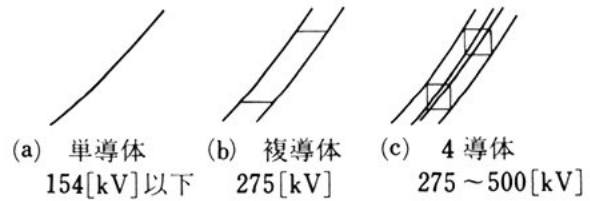
架空送電線路に用いる電線として必要な条件は，1) 導電性がよいこと，2) 機械的強さ（とくに引張強さ）が大きいこと，3) 耐久性が大きいこと，4) 密度が小さいこと，5) 価格が安いこと，などである。表1は，架空送電線路に用いる代表的な電線の例であるが，硬銅線と**鋼心アルミより線**（**ACSR**：aluminium cable steel reinforced）が最も広く用いられている。太い単線は，しなやかさが欠け，取り扱いが困難なため，架空送電線路用電線にはより線（素線を数本ない

表 1　代表的な送電用電線の例

電線	構　　造	特徴と用途
硬銅より線	荒引銅線をダイスでしだいに細くし，所要の太さにしたもので，同心より線とよばれる。	導電率が高く，耐食性も強く，引張強さが適度である。低圧送電線路に広く用いる。
鋼心アルミより線	中心に亜鉛めっき鋼より線を用い，そのまわりに硬アルミ線をより合わせたもの。 鋼線 硬アルミ線	アルミ線を使用するので質量が小さく，鋼心であるから引張強さが大きい。 長径間の送電線路に適している。 外径が大きいので，コロナ放電が発生しにくい。 超高圧送電線路に広く用いる。
イ号アルミ合金線	アルミニウムにけい素（0.5～0.6[%]）とマグネシウム（0.4～0.5[%]）を加えた合金線をより合わせたもの。	導電率は低下するが，引張強さは増加する。 長径間用の送電線路に適している。
銅合金線	銅にカドミウム（1[%]）を加えた合金線をより合わせたもの（カドミウム銅線）および銅にすず（0.8[%]）と微量のけい素を加えた合金線をより合わせたもの（けい銅線）とがある。	引張強さが硬銅線より大きい。 長径間用の送電線路に適している。
ウェルド線	鋼線のまわりに銅を被覆し，融着したもので，銅覆鋼線とよばれる。	引張強さがとくに大きい（硬銅線のほぼ3倍）。 長径間用の送電線路に適している。
アルミ覆鋼線	鋼線のまわりにアルミニウムを被覆したもの。	ウェルド線よりも導電率はやや低いが，質量が小さい。 長径間用の送電線路に適している。

し数十本もより合わせ，引張強さを大きくしたもの）が用いられる。

図 1　1相の電線方式

多導体　大電力送電に用いる超高圧送電線では，高い電圧のもとに大きな電流が流れる。そこで，コロナ放電防止を考えるとともに，大電流を流すために，図1に示すように，2本以上のACSRを架線する方法がとられている。

問 1.　硬銅線およびACSRの構造を調べ，特徴と用途を述べよ。

(2) 支　持　物

送電線路の支持物には，鉄塔・鉄筋コンクリート柱・鉄柱・木柱などが使用されている。このうち鉄塔は60 [kV] 以上の送電線路，送電容量の大きな重要送電線路(幹線)の支持物として必ず用いられている。鉄塔は，亜鉛めっきをした形鋼・鋼板・鋼管などを，図2のように組み立てたものであり，使用電圧・電線数・地形・気象状態などによって，いろいろな形状のものがある。なお，電線を保持し

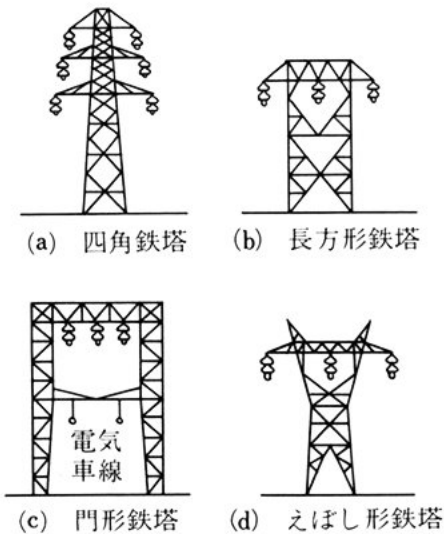
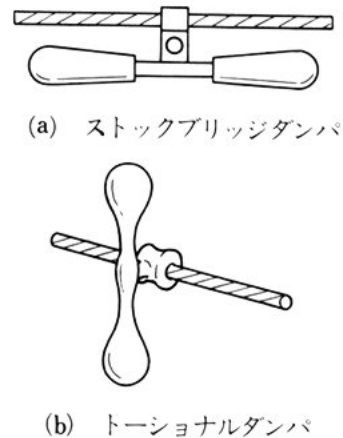
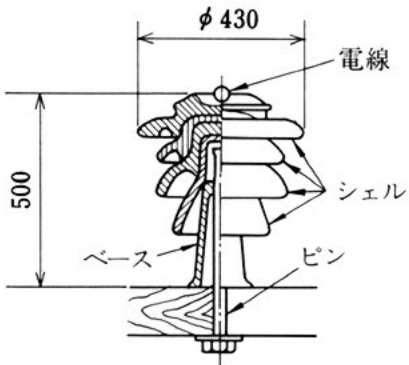
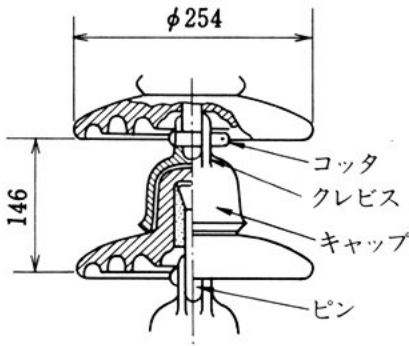
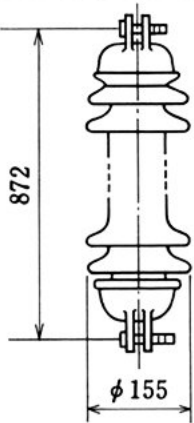
図 2　各 種 の 鉄 塔

(a) ストックブリッジダンパ

(b) トーショナルダンパ

図 3　ダンパ（制動子）

ているクランプのところで，風圧などで架線が振動しても断線しないように，クランプ近くに防振金具として，図3に示すストックブリッジダンパまたはトーショナルダンパを取り付ける。

表2 がいしの種類

名称	外　　　形　(単位 mm)	特　　　徴
ピンがいし	φ430 電線 500 シェル ベース ピン 60号(60[kV]級)	2〜4枚の磁器片（シェル）をセメントで接着している。 使用電圧が高くなるほど，磁器片の層数が多くなり，直径が大きくなる(10号〜60号まで6種類)。 形状が大きくなると不経済となる。
懸垂がいし	φ254 146 コッタ クレビス キャップ ピン	250 mm形と180 mm形とがあるが，送電線路には一般に250 mm形が用いられる。 送電電圧に応じて適当な個数を連結する(230 [kV] 以上では16個)。 絶縁劣化や破損のときはその部分だけを取り換えればよい。 引張荷重の大きなところでは，2連以上並列にして使用される。
長幹がいし	872 φ155	棒状磁器に円形状のひだを設け，上下に連結用金具を取り付けてある。 機械的強度が大きく，磁器のきれつが少ないのでがいしの劣化率が低い。 塩害に対し絶縁性が優れている。 コロナ放電が生じにくく，耐アーク性が優れている。

(3) が　い　し

支持物に電線を保持する場合，電線は支持物とじゅうぶん絶縁する必要がある。その絶縁体として硬質磁器の**がいし** (insulator) が用いられる。表2は，送電線路に用いる代表的ながいしの例である。

がいしの性能を決めるものとしては，1) フラッシオーバ電圧，2) 汚損特性，3) 耐アーク性，4) 機械的強度，5) 油中破壊電圧などがあるが，このうちとくに重要なものはフラッシオーバ電圧と油中破壊電圧である。がいしに商用周波電圧または衝撃波電圧を加え，これをしだいに高くしていくと，周囲の空気を通して**フラッシオーバ** (上下金具間にアークが発生する現象) を生じる。このときの電圧を**フラッシオーバ電圧**といい，周囲の状態や加える電圧によって，表3のように分けられる。

また，がいしの磁器内部の絶縁強度を知るために，絶縁油中にがいしを浸してその両極間に商用周波電圧を加えて行う油中耐電圧試験および油中破壊試験がある。これによって，がいしの内部が電気的に貫通破壊するときの電圧を**油中破壊電圧**という。表4は，フラ

表 3　フラッシオーバ電圧の種類

フラッシオーバ電圧	周囲の状態	加える電圧	備考
乾燥フラッシオーバ電圧	温度20[℃]，気圧760[mmHg]，相対湿度63[%]の空気中でフラッシオーバを起こさせる。	商用周波の電圧	乾燥したがいしの性質を表す。
50%衝撃フラッシオーバ電圧		衝撃波の電圧	
注水フラッシオーバ電圧	抵抗率100[Ω·m]の水をがいし全面に45°斜め上から3[mm/min]の割合で，降雨状に噴射しながらフラッシオーバを起こさせる。	商用周波の電圧	ぬれたがいしの性質を表す。

(JIS C 3801-1978)

表 4　フラッシオーバ電圧および油中破壊電圧の標準電圧 [kV]

がいしの種類		乾燥フラッシオーバ電圧	注水フラッシオーバ電圧	50% 衝撃フラッシオーバ電圧	油中破壊電圧
懸垂がいし	ϕ 250 [mm]	80	50	125	140 以上
	ϕ 180 [mm]	60	32	100	120 以上
特別高圧ピンがいし	10 号	85	55	120	150 以上
	20 号	110	75	160	200 以上
	30 号	135	95	200	250 以上
	40 号	160	115	240	270 以上
	50 号	185	135	280	300 以上
	60 号	210	155	320	350 以上

(JIS C 3810, 3811, 3813 による。)

ッシオーバ電圧および油中破壊電圧の標準電圧 [kV] を示す。

がいしを支持物に取り付け，電線を保持させる場合，適当ながいし金具を使用するが，がいしを雷などの異常電圧から保護する目的で，図 4 に示すアークホーンおよび架空地線が設けられる。アークホーンはがいしの両端に設け，アークを電極間で放電させ，がいし表面に溶融金属が付着するのを防いでいる。また，架空地線は送電線の上部に 1 本または 2 本架設した接地線をいう。

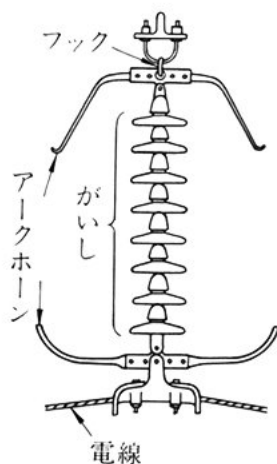



図 4　アークホーン

問 2.　長幹がいしは，塩害の多い地方で有利である。なぜか。

2.　架空送電線路の線路定数

送電線路には，電線の種類・断面積・配置によって定まる抵抗・インダクタンス・静電容量があり，これらを**線路定数**という。線路定数は電線路の等価回路や電圧降下を知るために重要な定数である。

（1） 抵　　抗

送電線路の長さを l [km]，電線の断面積を A [mm²]，抵抗率を ρ [Ω・mm²/m] とすると，l [km] の電線１本の抵抗 R [Ω] は，次の式で表される。

$$R = 1000\rho\frac{l}{A} \tag{1}$$

電線の抵抗率 ρ [Ω・mm²/m] は実用上，硬銅線では $\frac{1}{55}$，鋼心アルミより線はアルミニウムの部分だけを考えて $\frac{1}{35}$ で計算すればよい。なお，温度上昇によって電線の抵抗は大きくなるが，T [°C] における抵抗 R_T [Ω] は，20 [°C] における抵抗を R_{20} [Ω]，抵抗の温度係数を α_{20} とすれば，次の式で表される。

$$R_T = R_{20}\{1 + \alpha_{20}(T - 20)\} \tag{2}$$

問 3. 長さ 200 [km] の三相三線式送電線路がある。次の電線を用いたとき，その電線１本の抵抗を計算せよ。

(1) 断面積 100 [mm²] の硬銅線

(2) アルミニウムの断面積 100 [mm²] の鋼心アルミより線

（2） インダクタンス

図５に示すように，正三角形の頂点に配置した三相送電線路のインダクタンスは，自己インダクタンスと相互インダクタンスの両方を合わせたもので**作用インダクタンス**といい，電線１条１[km] 当たりの値を用いる。半径 r [m] の３本の電線が，線間距離 D [m] で配置されている場合，自己インダクタンスを L_e [H]，相互インダクタンスを M [H]，また電線の比透磁率を μ_s とすれば，電線１本の作用インダクタンス L は，次の式で求められる。

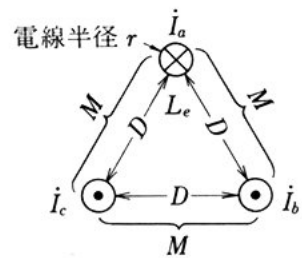



図５ インダクタンス

$$L = L_e - M = \left(2\log_e \frac{D}{r} + \frac{\mu_s}{2}\right) \times 10^{-7}\ [\mathrm{H/m}]$$

$$= 0.4605 \log_{10} \frac{D}{r} + 0.05\mu_s\ [\mathrm{mH/km}] \qquad (3)$$

なお，硬銅線や鋼心アルミより線では，$\mu_s \fallingdotseq 1$ である。

例題 **1**．図6に示す三相送電線路の電線1本の作用インダクタンス L を求めよ。ただし，電線は硬銅線を使用し，断面積 S は 200 [mm²] で，線間距離 D は 4 [m] とする。

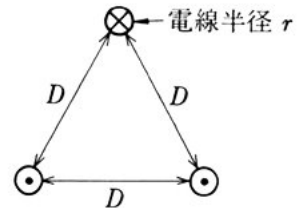



図6　三相送電線路

解答　電線の半径 r [m] は，$S = \pi r^2$ より

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{200 \times 10^{-6}}{\pi}} = 7.98 \times 10^{-3}\ [\mathrm{m}]$$

また，硬銅線では，$\mu_s \fallingdotseq 1$ である。

したがって，作用インダクタンス L は，次の式で求められる。

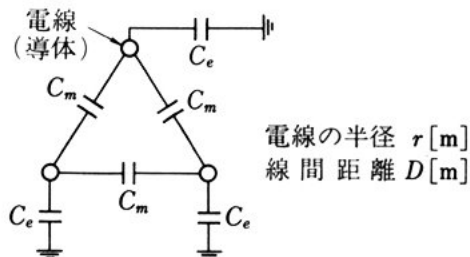
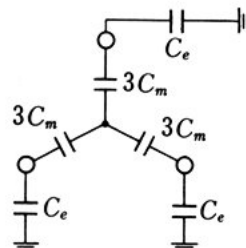
$$L = 0.4605 \log_{10} \frac{D}{r} + 0.05\mu_s$$

$$= 0.4605 \log_{10} \frac{4}{7.98 \times 10^{-3}} + 0.05 \times 1$$

$$= 0.4605 \times 2.7 + 0.05 = 1.29\ [\mathrm{mH/km}]$$

(3)　静　電　容　量

図7(a)に示すように，正三角形の頂点に配置した3本の電線に

図7　架空送電線の静電容量

(a) 正三角形配置の
三相三線式静電容量

(b) 図(a)の等価回路

は，電線と電線の間，電線と大地の間，それぞれに静電容量が分布している。2線間の静電容量 C_m を**線間静電容量**，電線1本と大地間の静電容量 C_e を**対地静電容量**という。図(a)の回路に三相交流電圧を加えると，これらの静電容量に充電電流が流れるが，線間静電容量は，図(b)のような等価回路で表されるから，$C=C_e+3C_m$ に対する充電電流を，電線1本当たりの充電電流としてよい。この等価静電容量 C を**作用静電容量**という。作用静電容量 C は，電線の形状と配置によって決まる定数で，次の式で表される。

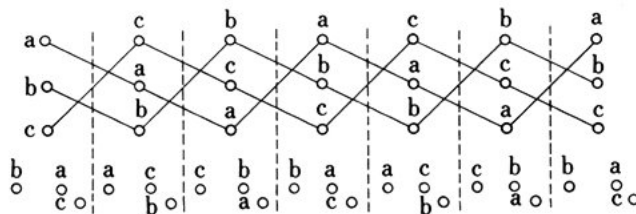
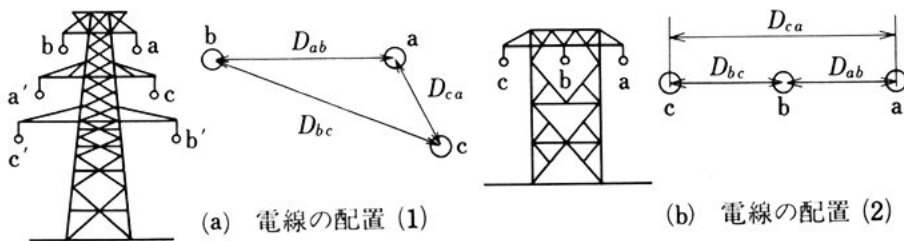
$$C=C_e+3C_m=\frac{0.02413}{\log_{10}\dfrac{D}{r}}\quad[\mu\mathrm{F/km}]\qquad(4)$$

架空送電線の C_m，C_e の値は，それぞれ 0.0015 [μF/km]，0.005 [μF/km] 程度であるから，作用静電容量の値は，およそ 0.01 [μF/km] である。

（4） ね　ん　架

三相回路としての3本の電線は，一般的に正三角形の頂点に配置

図 8　電線の配置とねん架

(a) 電線の配置 (1)　(b) 電線の配置 (2)

(c) 6区間のねん架

されるとしたが，実際は，鉄塔の構成上，図 8 (a)，(b) のように配置する。

この場合は，各線のインダクタンスや静電容量が等しくないため，電圧降下が一様でなく，対称三相回路として扱うことができない。そこで，図 (c) の例では，送電端から受電端までの全区間を 3 の倍数に分け，3 本の電線の配置を順次入れ換えると，全区間については，各線のインダクタンスと静電容量を平衡させることができる。このようにすることを**ねん架**という。

図 8 (a)，(b) において，ねん架したときの等価な線間距離 D_l [m] は，次の式で計算される。

$$D_l = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} \qquad (5)$$

問 4. ねん架をする理由および，その方法を述べよ。

問 5. 公称電圧 220 [kV]，電線路の長さ 100 [km]，周波数 60 [Hz] の三相三線式送電線路の充電電流はおよそいくらか。

3. 架空送電線路の等価回路と電圧降下

(1) 短距離送電線路

送電端から受電端までの長さが十数キロメートルの短距離送電線路では，静電容量は小さいので，図 9 に示すように，静電容量を無視し，集中回路として取り扱うことができる。ただし，r は 1 線当たりの全抵抗，x は 1 線当たりの作用インダクタンスによるリアクタンスである。

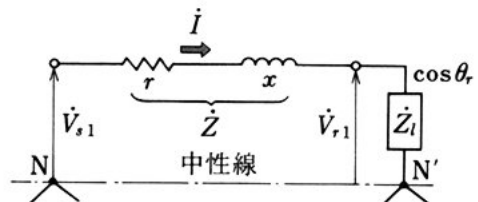



図 9 短距離送電 1 相分 (Y)

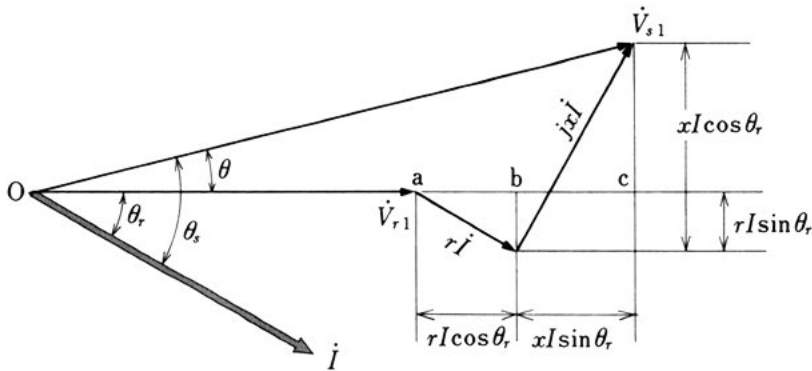



図 10　1相分のベクトル図

いま，図9において，$\dot{V}_{s1}$ と $\dot{V}_{r1}$ との位相差を θ とすると，受電端の相電圧 $\dot{V}_{r1}$ [V] を基準としてベクトル図をかけば，図10となる。

ふつう，$\theta=\theta_s-\theta_r$ は小さいので，$V_{s1}\fallingdotseq\overline{\mathrm{Oc}}$ としてよい。したがって，相電圧 V_{s1} [V] は，次の式で表される。

$$V_{s1}\fallingdotseq\overline{\mathrm{Oc}}=\overline{\mathrm{Oa}}+\overline{\mathrm{ab}}+\overline{\mathrm{bc}}=V_{r1}+rI\cos\theta_r+xI\sin\theta_r$$
$$=V_{r1}+(r\cos\theta_r+x\sin\theta_r)I$$

よって，送電端の線間電圧 V_s [V] と受電端の線間電圧 V_r [V] との関係は，上式から次のように表される。

$$V_s\fallingdotseq V_r+\sqrt{3}\,I(r\cos\theta_r+x\sin\theta_r) \tag{6}$$

したがって，電線路の電圧降下 v [V] は次の式で与えられる。

$$v=\sqrt{3}\,I(r\cos\theta_r+x\sin\theta_r) \tag{7}$$

また，線路の電圧降下率 ε [%] は，次の式で与えられる。

$$\varepsilon=\frac{v}{V_r}\times100=\frac{V_s-V_r}{V_r}\times100 \tag{8}$$

問 6.　三相三線式電線路において，$r=5$ [Ω]，$L=20$ [mH]，$I=500$ [A]，$\cos\theta_r=0.8$ のとき，送電線路の電圧降下はいくらか。ただし，周波数は 50 [Hz] である。

(2) 中距離送電線路

長さが 100〜150 [km] 程度の送電線路では，静電容量は無視できない。しかも，R，L，C は全長にわたって分布しているので，そのままでは取り扱いが困難である。そこで，作用静電容量によるアドミタンスを1か所に集中して取り扱うT形回路または2か所にまとめるπ形回路によって，近似計算が行われている。

図11(a)に示す回路を**T形回路**という。全長の抵抗を r [Ω]，作用リアクタンスを L [H]，作用静電容量を C [F] とすると，$\dfrac{\dot{Z}}{2}=\dfrac{r}{2}+\dfrac{j2\pi fL}{2}$ [Ω]，$\dot{Y}=j2\pi fC$ [S] である。

図(b)は，図(a)の電圧・電流のベクトル図であり，T形回路における電圧・電流の関係は，次の式で表される。

$$\left.\begin{aligned}\dot{V}_c&=\dot{V}_{r1}+\frac{\dot{Z}}{2}\dot{I}_r, &\quad \dot{I}_c&=\dot{Y}\dot{V}_c\\ \dot{I}_s&=\dot{I}_r+\dot{I}_c, &\quad \dot{V}_{s1}&=\dot{V}_c+\frac{\dot{Z}}{2}\dot{I}_s\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

また，線路の電圧降下 v_T [V] は次の式で表される。

図11　T形回路

(a) T形回路

(b) 図(a)のベクトル図

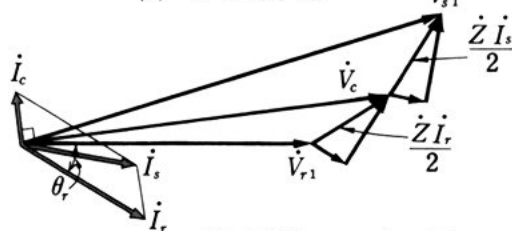
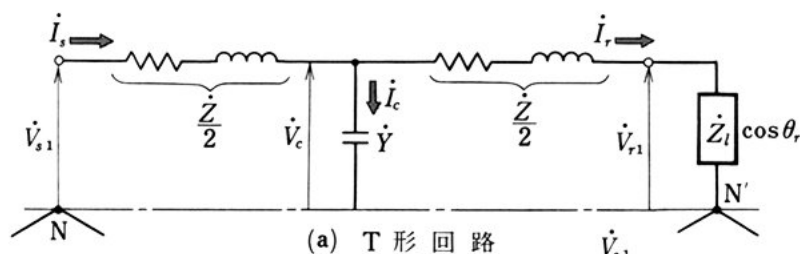
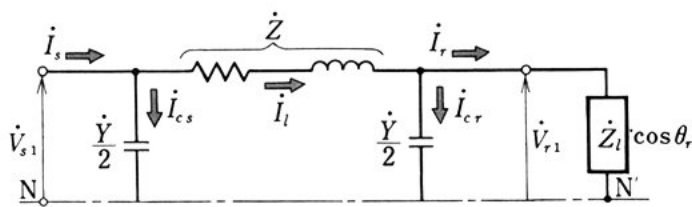
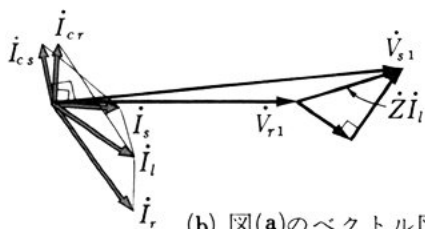
(a) π形回路

(b) 図(a)のベクトル図

図 12　π　形　回　路

$$v_T = \sqrt{3}\,(V_{s1} - V_{r1}) \tag{10}$$

図 12(a)のような回路を**π形回路**という。図(b)は，図(a)の電圧・電流のベクトル図であり，電圧・電流の関係は，次の式で表される。

$$\left.\begin{aligned} &\dot{I}_{cr} = \frac{\dot{Y}}{2}\dot{V}_{r1}, \qquad \dot{I}_l = \dot{I}_r + \dot{I}_{cr} \\ &\dot{V}_{s1} = \dot{V}_{r1} + \dot{Z}\dot{I}_l, \qquad \dot{I}_{cs} = \frac{\dot{Y}}{2}\dot{V}_{s1} \\ &\dot{I}_s = \dot{I}_l + I_{cs} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

また，電線路の電圧降下 v_π [V] は次の式で表される。

$$v_\pi = \sqrt{3}\,(V_{s1} - V_{r1}) \tag{12}$$

問 7.　$C = 0.01$ [μF/km] として，150 [km] の電線のアドミタンスを求めよ。ただし，周波数は 60 [Hz] とする。

問 8.　240 [mm²] の ACSR の 250 [km] の抵抗・誘導リアクタンス (1.3 [mH/km])・容量サセプタンス (0.0095 [μF/km]) を求め，T 形回路を作れ。ただし，周波数は 50 [Hz] とする。

問 9.　図 11 で，$\dot{V}_{r1}$ が 150 [kV]，$\dot{I}_r$ の大きさが 500 [A]，位相角 θ_r が $-30°$ として，前問の回路の $\dot{V}_{s1}$ を求めよ。

4. 地中送電線路

(1) 電力ケーブル

電力ケーブルとは，導体を絶縁したあと，さらにその上を保護被覆で外装したものである。

地中送電線路は，架空送電線路に比べて建設費が高く，事故場所の発見や修理が困難であるが，風水害・雷および火災などに対する安全性が高く，それだけ送電の信頼度が期待できる。また，保安・美観の点からも，都会地で望まれる電力輸送設備である。

図13は,電力ケーブルの構造を示したものである。

電流を流すための導線を**心線**といい，大地および他の相の心線と絶縁するため，各心線の心絶縁がじゅうぶんに施される。

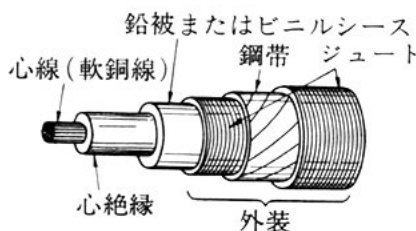
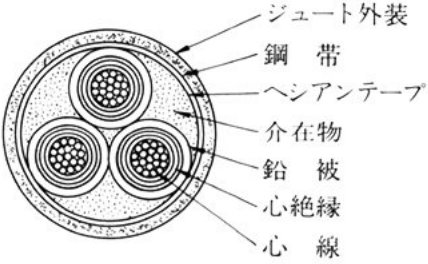
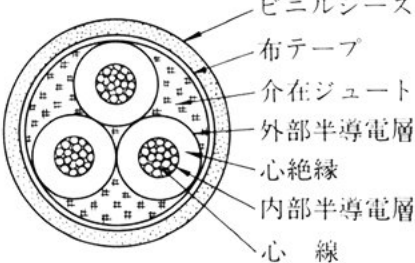
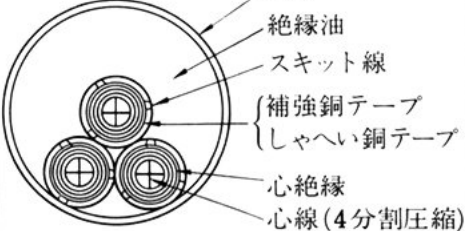



図 13　電力ケーブルの構成

電力ケーブルは地中に布設するので，腐食しないように，鉛やビニルで被覆（鉛被・ビニルシース）し，完全に気密にする。さらに，機械的強さを大きくする必要があるときは，鋼線・鋼帯などで外装する。電力ケーブルは，心絶縁の構造によって，表5のように分類できる。

問 10. 心絶縁の油浸紙にすきまを生じると，絶縁耐力が低下するのはなぜか。

問 11. SL ケーブルに比べて，CV ケーブルの優れている点を列記せよ。

表 5 主な電力ケーブル

名称	構　　造	特　　徴
鉛被紙ケーブル(SL)	ジュート外装 鋼　帯 ヘシアンテープ 介在物 鉛　被 心絶縁 心　線	◦20〜30 [kV] の電線に用いられる。 ◦油浸紙で心絶縁を行い，各相を鉛被し，介在物を配し，ヘシアンテープを巻いたもの。 ◦心絶縁の絶縁耐力は従来のベルトケーブルより大きい。 ◦温度変化によって鉛被が膨張，収縮して心絶縁物内にすきまを生じ，絶縁物劣化の原因となる。
架橋ポリエチレンケーブル(CV)	ビニルシース 布テープ 介在ジュート 外部半導電層 心絶縁 内部半導電層 心　線	◦110 [kV] 程度の電線路にまで使用される。 ◦架橋ポリエチレン（絶縁性が高く，高温でゴム並みの弾性を示す材料）で心絶縁を行い，その内外に半導電層を入れ，外部にビニルシースを施したもの。 ◦架橋ポリエチレンは油浸紙に比べて，耐食性，耐水性，絶縁性，耐熱性などに優れ，経済的にも有利である。 ◦絶縁工法が簡単である。
油入ケーブル(OF)	心　線 心絶縁 アルミテープ 銅線織込み綿テープ アルミ被シース ビニル防食層 介在紙ひも 亜鉛めっき鋼スパイラル	◦60 [kV] 以上の電線路に広く用いられる。 ◦心線絶縁間の介在ジュート充てん部に油道（亜鉛めっき鋼スパイラル）を設け，粘度の低い圧油を充満密封したもの。 ◦心絶縁油浸紙の絶縁耐力を増加させる。 ◦心絶縁物内のすきまの発生を防ぐ。
パイプ形油入ケーブル(POF)	鋼管 絶縁油 スキット線 {補強銅テープ しゃへい銅テープ 心絶縁 心線(4分割圧縮)	◦超高圧用として使用される。 ◦気密にした防食鋼管内にケーブル心線を3心引き入れ，窒素ガスまたは絶縁油を高圧で充てんしてあるもの。 ◦心絶縁部を加圧し，耐電圧特性を上げている。 ◦外圧形（コンプレッション形）と内圧形（フィールド形）とがある。

(2)　電力ケーブルの布設法

地中電線路の電力ケーブルは，工事・保守に便利な道路に沿って布設されることが多く，その布設法には，直接埋設式・管路式・共同溝式などがある。表6は各布設法を比較したものである。

電力ケーブルの布設に当たっては，道路の状況や道幅，事故の復旧時間やサービス，工事の際の公害や地域への影響，経済性などを

表 6　電力ケーブルの布設法

布設法	敷　　設　　図	特　　　徴
直接埋設式	地表面 土かぶり ふた 川砂 トラフ 電力ケーブル	◦堅ろうな管またはコンクリート製トラフを敷き並べてケーブルを収め，砂を詰め，ふたをして埋設する方法。 ◦ケーブル条数の少ない郊外などの道路に採用される。 ◦埋設の深さ（土かぶり）は，車両その他の重量物の圧力を受ける場所では 1.2 [m] 以上，その他の場所では 0.6 [m] 以上とする。
管路式	道　路 管路(予備穴) 電力ケーブル 胴締め (管路の継ぎ目などを支える)	◦鉄管・鉄筋コンクリート管などで地中管路を作り，100～200 [m] ごとに設けたマンホールからケーブルを引き入れる方法。 ◦ケーブル条数の多い幹線道路や，将来ケーブル増設・引き換えが予想される場合に採用される。 ◦管路の埋設深さは 1.2 [m] 以上とする。 ◦直接埋設式に比べて建設費が高い。
共同溝式	電話線路 道　路 電力ケーブル ガス管路 下水道管路 水道管路 地下鉄	◦地下に設けられた半永久的な構造物で，電力ケーブルの他，上下水道，ガス管，電話ケーブルなどの地下埋設物を共同で収容する方法。 ◦交通量が多く重要な道路で，再掘削困難な場合に採用される。 ◦保守・管理・増設が容易にできる。

考慮することが重要である。

なお，管路式ではケーブル条数を多くした場合，ケーブルによる発熱で送電効率がいちじるしく低下するので，他の布設法よりも電流容量は大きくできない。

5　**問 12.**　電力ケーブルの布設法を三つ挙げ，その特徴を比較せよ。

問 13.　補修点検に最も有利な電力ケーブルの布設法は何か。

5.　電力ケーブルの電気的特性

（1）　線　路　定　数

地中送電線路も，架空送電線路と同じような特性をもっているが，

10　地中に埋設されるため，その線路定数は，かなり異なった値となる。

抵　抗　　電力ケーブルの心線は軟銅線であるから，抵抗率は比較的小さい。

作用インダクタンス　　架空送電線の場合と同様に，作用インダクタンスは，96ページの式（3）で計算されるが，表7(a)に示すように，導体間の距離 D [m] が小さいので，架空送電線の $\frac{1}{3}$〜$\frac{1}{6}$ 程度

15

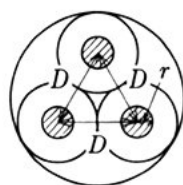
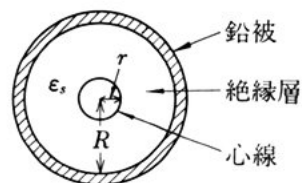
である。

静電容量　　表7(b)に示すような単心鉛被ケーブルの静電容量 C [μF/km] は，次の式で計算される。

$$C=\frac{0.02413\varepsilon_s}{\log_{10}\frac{R}{r}} \tag{13}$$

20　ただし，ε_s は含浸紙絶縁層の比誘電率で，3.4〜3.9程度である。

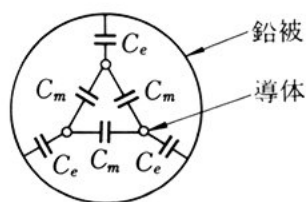
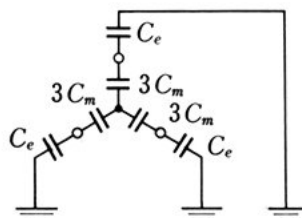
また，架空送電線の $\frac{D}{r}$ に対し，地中送電線の $\frac{R}{r}$ が小さいので，その静電容量は，架空送電線の20〜25倍にもなっている。

表 7 電力ケーブルの線路定数

(a) ケーブルの心線距離(心線半径)

(b) 単心鉛被ケーブル

ケーブルの種類	導体		最大導体抵抗 [Ω/km] 20 [°C]	インダクタンス [mH/km]	最大静電容量 [μF/km]
	断面積 [mm²]	形			
22 [kV] 3心	250	扇形	0.07392	0.264	0.3
	150		0.1220	0.287	0.3
	100		0.1830	0.313	0.3
	60		0.3050	0.348	0.2
22 [kV] SL 3心	250	円形	0.07149	0.307	0.5
	150		0.1167	0.329	0.4
	100		0.1779	0.350	0.3
	60		0.3006	0.389	0.3

(電気学会「送配電工学(送電編 3)」による)

図 14(a)は，3心ケーブルの静電容量分布を示す。その1線当たりの作用静電容量は，図(b)から，$C=C_e+3C_m$ となる。しかし，この値は，式(13)の簡単な式では計算できず，一般には，実測によって求められている。

図 14 3心ケーブルの静電容量

(a) 静電容量分布

(b)

問 14. 電圧 33 [kV]，周波数 60 [Hz]，長さ 7 [km] の，1 回線地中送電線路の無負荷充電電流はいくらか。ただし，ケーブルの作用静電容量は 0.4 [μF/km] とする。

（2） 電力ケーブルの電力損失

電力ケーブルの電力損失には，心線の抵抗損のほかに，絶縁層に生じる誘電損，鉛被内の電流によるシース損がある。

抵抗損 は，心線導体の抵抗による損失で，架空送電線路の場合と同じようにして求められる。

図 15 に示すように，ケーブルの心線は誘電体で絶縁されているから，心線と鉛被との間に静電容量が形成される。これに交流電圧を加えると，誘電体に進み電流が流れる。この電流による損失が **誘電損** である。絶縁体が劣化してくるほど誘電損は大きくなるが，10 [kV] 以下の場合は無視できる。

ケーブルの心線に電流が流れると，その周囲に磁束が生じ，図 16 に示すように，鉛被の長さの向きに鉛被電圧を発生し，鉛被電流が流れる。この電流による損失が **シース損**（鉛被損）である。

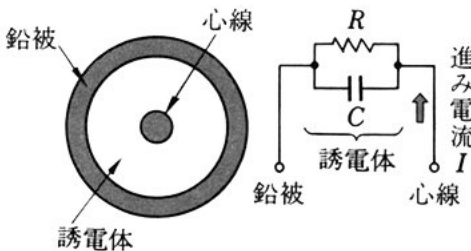
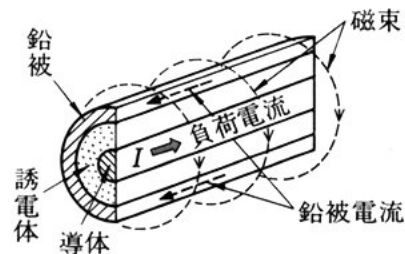



図 15 ケーブルの誘電損　　**図 16 ケーブルの鉛被電流**

そこで，鉛被電圧・鉛被電流が，あまり大きくならならないようにするためには，図 17 (a) に示すように，鉛被の接地区間 (1，2間) に

(a)　クロスボンド方式
(単心ケーブル3個を用いた三相送電)

(b)　一つの鉛被回路

(c)　鉛被接地変圧器

(d)　3心ケーブル

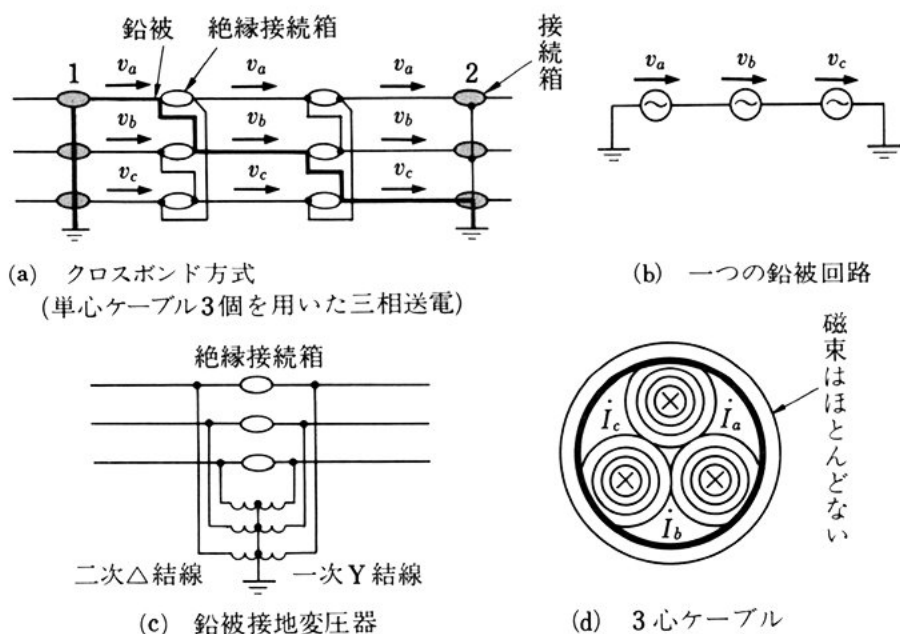



図17　鉛　被　電　圧

2個の**絶縁接続箱*** を設けて鉛被を絶縁したうえ，各線路区間を図のように接続する。このようにすると，鉛被電圧は各区間に誘導されるが，その合成電圧は図(b)に示すように，対称三相電圧の直列和であるから，電流は流れない。この方法を**クロスボンド方式**という。

送電回路の故障時には，高い鉛被電圧が発生することがあるが，この方法によると，大きな誘導電流が流れないので，危険な電圧が現れない。

他の方法としては，図(c)のように，**鉛被接地変圧器**とよばれる特殊な変圧器を，絶縁接続箱の前後の鉛被に接続する。

3心ケーブルでは，三相の導体が接近しているから，ふだんはほとんど鉛被電圧はない。しかし，故障時の鉛被電圧を軽減すると同時に，故障電流を大地に流すため，鉛被を接地する。

* ケーブルの接続部を保護するための鋳鉄製のカバーで，ケーブルの鉛被を電気的に遮断できる構造にしたもの。

問　　題

1. 架空送電線路に比べて地中送電線路の長所と短所を挙げよ。

2. 架空送電線路に用いる電線の種類と特徴を説明せよ。

3. 次の電力ケーブルについて説明せよ。

5　(1) OF ケーブル　(2) SL ケーブル

4. 次の事項を簡単に説明せよ。

(1) アークホーン　(2) 多導体　(3) クロスボンド方式

5. ケーブルの電力損失を 3 種類に分けて説明せよ。

6. がいしの種類と特徴を説明せよ。

10　**7.** 電線 1 本の抵抗が 3 [Ω], リアクタンスが 4 [Ω] の三相三線式送電線路の受電端に電圧 60 [kV] で力率 60 [%] の負荷 30000 [kW] を接続するとき, 送電端電圧はいくらか。また, この電線路で電圧降下率を 10 [%] に保つとき, 力率 80 [%] の負荷ならば最大何 [kW] まで受電できるか。

15　**8.** 図 18 は, 完全にねん架された ACSR 200 [mm²] を用いた 1 回線送電線路のインダクタンスと静電容量を示している。長さを 200 [km] として, 50 [Hz] の対称三相電圧・電流のときの T 形回路, π 形回路を 1 相分で示せ。ただし, 抵抗は 0.147 [Ω/km] とする。

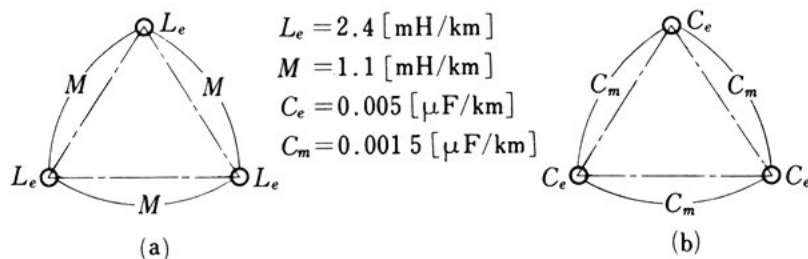



図 18

9. 直流送電は, 発電所で発生した交流電力を変圧器で昇圧し, 順変換装

20　置で直流電力に変換して行われる。負荷は, 一般に, 交流機器が多いの

で，受電端では，逆変換装置で直流を交流に変換する。

このような直流送電方式と，これまでに学んだ交流送電方式を比較して，次の問いに答えよ。

(1) 海底ケーブルのような長い送電線路に交流送電方式を用いると，どのような不都合があるか。　5

(2) 電線の対地電圧が等しいとき，絶縁はどちらが有利か。

(3) 電線の電流を遮断するのは，どちらが容易か。

10. 図19において，単心ケーブルが点Pで抵抗を通じて接地されている。図に示す2回の測定から，A，B間の距離を算出せよ。

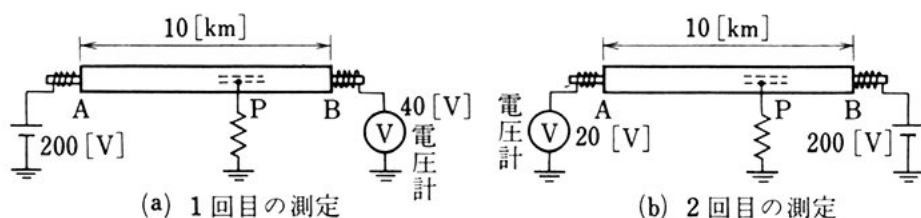



図 19

送電の運用

この節の目標　われわれが電気を使うとき，電源として望ましいことは，負荷が変化しても電圧が一定であり，停電のないことである。

負荷に対して，一定の電圧で電力を送る送電方式を定電圧送電というが，それは進相コンデンサ・分路リアクトル・同期調相機を用いて行うことができる。

送電線路に故障が生じると，停電する。そこで，できるだけ早く故障を察知し，故障回路を除去し，送電を続ける必要があるが，これを保護方式という。

ここでは，このような送電の運用について理解し，また，そのような機器が設置される変電所についても調べる。

1．定電圧送電

送電線路の送・受電端電圧の変動が少ないことは，需要家にとって望ましいばかりでなく，電線路や機器の絶縁に都合がよく，また他の系統との連系にも便利である。このようなことから，送・受電

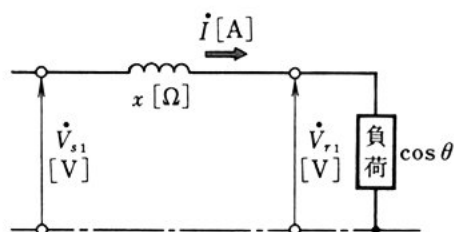
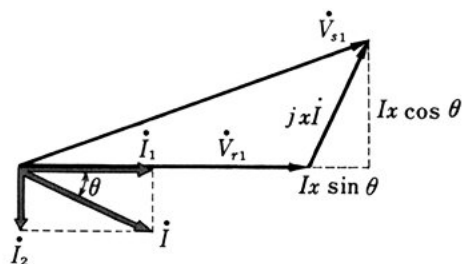



図 1　短距離送電線路

(a)　短距離送電線路　　(b)　ベクトル図

端電圧をそれぞれ一定に保って，電力を供給する定電圧送電方式が広く用いられている。

（1） 負 荷 の 変 化

短距離送電線路において，図1(a)に示すように，電線路の抵抗*を無視すると，電圧・電流の関係は図(b)で示される。したがって，電線路の電圧降下 v [V] は，次の式で計算できる。

$$v \fallingdotseq Ix\sin\theta \tag{1}$$

また，受電端電力を P_{r1} [W] とすると，$P_{r1}=V_{r1}I\cos\theta$ [W] であるから，電線路の電流 I [A] は，次の式で表される。

$$I=\frac{P_{r1}}{V_{r1}\cos\theta} \tag{2}$$

式（1）に式（2）を代入して受電端電力 P_{r1} [W] を求めると，

$$P_{r1}=\frac{vV_{r1}\cos\theta}{x\sin\theta}=\frac{vV_{r1}}{x\tan\theta} \tag{3}$$

となる。

式（3）において，電線路の電圧降下 v と受電端電圧 V_{r1} とが一定であるとすれば，x は線路定数であるから，$\tan\theta$ が大きくなれば P_{r1} は小さくなり，$\tan\theta$ が小さくなれば P_{r1} は大きくなることがわかる。つまり，負荷の力率 $\cos\theta$ が変化すれば，負荷電力 P_{r1} も変化することになる。

したがって，負荷が変化しても力率を調整することによって受電端電圧 V_{r1} を一定に保てることになる。

また，図(a)の送電端電圧 V_{s1} は，発電所において発電機の励磁調整により自動電圧調整が行われ，定電圧送電をしている。

問 1. 定電圧送電方式には，どんな利点があるか。

---

* ふつうの送電線の抵抗は，作用リアクタンスの $\frac{1}{5}\sim\frac{1}{10}$ である。

(2) 力 率 調 整

受電端電圧を一定に保つために力率を調整するには，**調相設備**を負荷に並列に接続する。調相設備には力率を進めるのに使われる**進相コンデンサ**，力率を遅らせるのに使われる**分路リアクトル**，また両方の調整が可能な**同期調相機**などがある。

いま，図2(a)において，負荷電流Iが，$\overline{\mathrm{Oa}}$から$\overline{\mathrm{Ob}}$に増加すると，受電端電圧が変化する。そこで，図(b)に示すように，進相コンデンサを負荷と並列に接続し，進み無効電流$I_c=\overline{\mathrm{bc}}$を供給して，電線路の電流$I_{r1}$ ($\overline{\mathrm{Oc}}$) が円周上* にくるように力率を調整すれば，一

図2 力 率 調 整

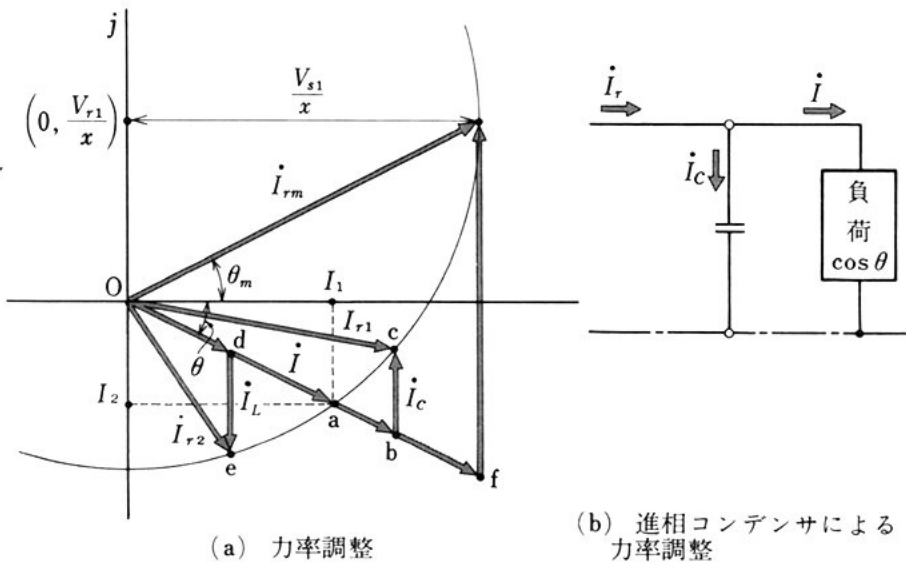
(a) 力率調整　(b) 進相コンデンサによる力率調整

* 送・受電端電圧を一定に保つための電線路の電流の軌跡に当たり，これを**電流円線図**という。

図1(b)において，送電端電圧 $\dot{V}_{s1}$ [V] は，

$$\dot{V}_{s1}=V_{r1}+jx\dot{I}=V_{r1}+jx(I_1+jI_2)=(V_{r1}-xI_2)+jxI_1$$

ゆえに，$V_{s1}{}^2=(V_{r1}-xI_2)^2+x^2I_1{}^2$　この両辺をx^2で割って整理すると，

$$\left(\frac{V_{s1}}{x}\right)^2=I_1{}^2+\left(I_2-\frac{V_{r1}}{x}\right)^2$$

上式は，中心が$\left(0,\ \frac{V_{r1}}{x}\right)$で，半径が$\frac{V_{s1}}{x}$の円の方程式である。

定の電圧を保つことができる。

また，図2(a)において，負荷電流 I が $\overline{\mathrm{Od}}$ に減少する場合には，図(b)の進相コンデンサの代わりに，負荷と並列に分路リアクトルを接続することによって遅れ無効電流 $I_L=\overline{\mathrm{de}}$ を供給するので，電線路の電流 I_{r2} は $\overline{\mathrm{Oe}}$ に増加する。

同期調相機は，その界磁電流を加減することによって，進みまたは遅れの無効電流を連続的に調整できる。そこで，同期調相機と進相コンデンサを併用して用い，進み電流の段階的な調整は進相コンデンサが行い，進み電流の微調整と遅れ電流の調整は同期調相機が行う。

このように定電圧送電を行うには，負荷の増減に応じて，進相コンデンサなどの調相設備に無効電力を供給すればよい。

極限受電電力　図2(a)において，負荷電流が増加するに従って，大容量の無効電力が必要になるばかりでなく，送電が不安定になる。このため，定電圧送電の限度は，負荷電流 $I=\overline{\mathrm{Of}}$ までであり，電線路の電流は I_{rm} となる。このときの受電電力 P_{rm} [W] は，**極限受電電力**とよばれ，次の式で表される。

$$P_{rm}=V_{r1}I_{rm}\cos\theta_m \qquad (4)$$

フェランチ効果　架空送電線路でも，その距離が長い場合や，地中送電線路のときは，電線路の静電容量は相当に大きくなる。受電端の負荷は，一般に誘導性であるから，受電端電圧は送電端電圧よりも小さいが，図3(a)に示すような無負荷あるいは軽負荷では，充電電流の影響の方が大きくなって，電流は，図(b)に示すように，進み電流となり，受電端電圧の方が送電端電圧よりも大きくなる。この現象を**フェランチ効果**といい，分路リアクトルや同期調相機を運転して防止する。

(a) 無負荷時の送電線路　　(b) ベクトル図

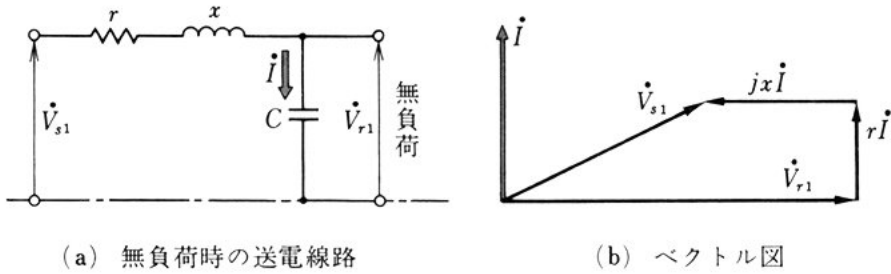



図 3 フェランチ効果

問 2. $V_{s1}=\frac{33}{\sqrt{3}}$ [kV], $V_{r1}=\frac{30}{\sqrt{3}}$ [kV], $x=10$ [Ω], $\cos\theta=0.6$(遅れ) の三相送電線路がある。送・受電端の電圧を一定に保つためには，負荷電力をいくらにすればよいか。

2. 送電線路の事故

(1) 接 地 事 故

送電線路では，一般に**地絡事故**(電線と鉄塔が，がいしの表面を通してアークで短絡する) の発生を防いだり，故障検出を確実にして電線路を保護するために，送電用変圧器の中性点を接地する。

いま，図 4 (a) に示す非接地回路が，点 A で地絡事故が発生すると，地絡電流 $\dot{I}_c$ は，図 (a) に示すように他の電線の C_0 を通して流れ，$\dot{I}_c$ の位相は，図 (b) のベクトル図からわかるように，故障 Y 相電圧 $\dot{V}_c$ [V] に対し，$\frac{\pi}{2}$ [rad] だけ進む。半周期ごとに電流が 0 となり，アークは消える。そのとき，故障相電圧は最も高くなるので，その電圧と対地静電容量 C_0 [F] による電荷が，アークが消えても故障線に残留する。続いて次の半周期の変化の間に，電源電圧の向きが反対になるから，電源電圧に残留電荷による電圧が加わって電圧が高くなり，ふたたびアークで地絡される。このことが繰り返されて，

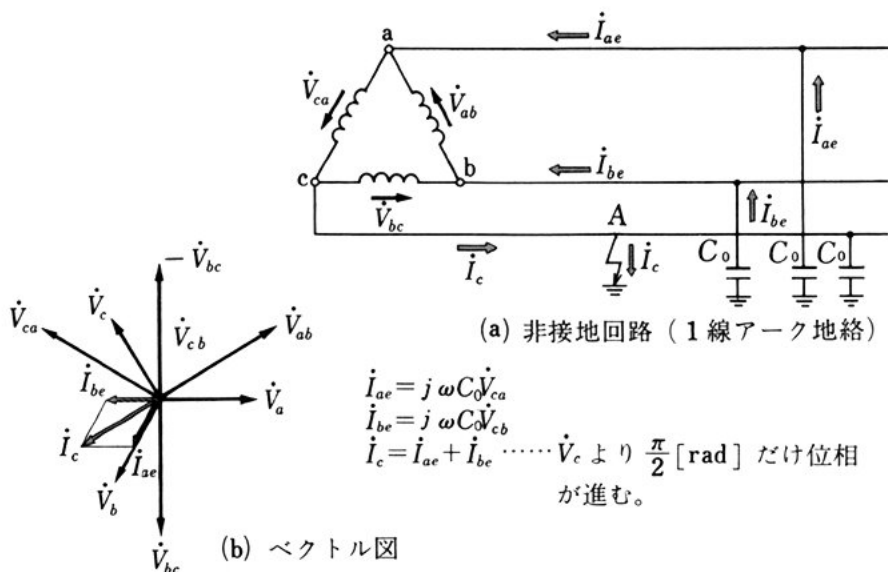
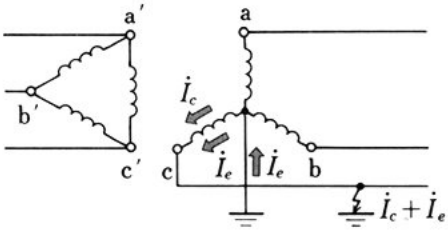
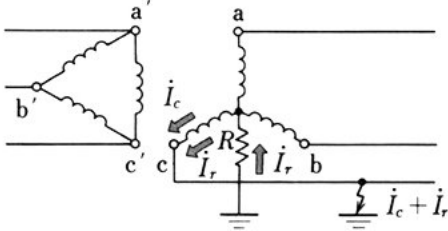
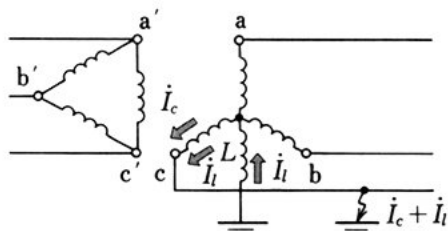



図4 接地事故

故障相電圧は，正常時の電圧の 3～4 倍にも達することがある。これを**間欠アーク地絡**という。また，残留電荷は，電線路を移動して他の正常な相に移り，残留電荷による電圧がその電線路の電源電圧に加わって，アーク地絡を生じることがある。

一般に，送電電圧が低い 40［kV］以下の送電線路の場合には，電線路や変圧器の絶縁も容易なので，図4に示す非接地方式による送電が行われる。この場合，1線地絡電流が少なく，そのまま送電を続けることができる。また，変圧器を△結線にしておけば，変圧器が故障してもV結線で送電を続けることができる。

（2） 接 地 方 式

間欠アーク地絡を防ぐには，地絡電流回路を静電容量以外のものにする。中性点の接地方式には，直接接地，抵抗接地，消弧リアクトル接地などがある。どの方式を採用するかは，送電系統の運用目的や経済面などを考慮して決める。

表1は，各接地方式の特徴をまとめたものである。

表 1　各接地方式と特徴

方式	接地方法	特徴
直接接地	送電線路に接続する変圧器の二次側をY結線にして，その中性点を直接大地に接続する方式	◦電線路や変圧器の絶縁を軽減できる。 ◦地絡事故のとき，地絡電流($\dot{I}_c+\dot{I}_e$)が大きいので，故障検出が確実にでき，故障回路の遮断が速くできる。 ◦地絡電流が大きなため，通信線への誘導障害（p. 116 参照）が大きくなる欠点がある。 ◦ 275 [kV] 以上の送電線路に用いられている。
抵抗接地	変圧器の中性点を100～1000 [Ω] 程度の抵抗で接地する方式	◦低抵抗の場合は，直接接地に近いので通信線への誘導障害が大きくなる。 ◦高抵抗の場合は，非接地回路に近い性質があるので，ここを流れる電流で働く保護継電器の動作特性がわるくなる。 ◦我が国では広く用いられているが，接地場所によって最も適当な抵抗値を選ぶ。
消弧リアクトル接地	変圧器の中性点を消弧リアクトル（鉄心入りリアクトル）を通じて接地する方式	◦地絡事故のとき，消弧リアクトルのインダクタンス L が $L=\frac{1}{(3\omega^2 C_0)}$ になるようにして，1線地絡電流を0にする。 ◦ 1線地絡時の消弧が早い。 ◦通信線に対する誘導障害が少ない。 ◦地絡電流による電線やがいしの損傷が少ない。 ◦設備費が高くつく欠点がある。 ◦我が国では広く用いられる。

問 3.　消弧リアクトルの働きについて説明せよ。

問 4. 間欠アーク地絡について説明せよ。

問 5. 非接地方式による送電の有利な点は何か。

(3) 誘 導 障 害

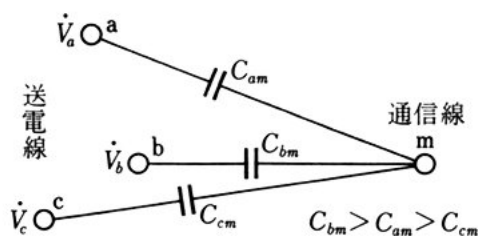
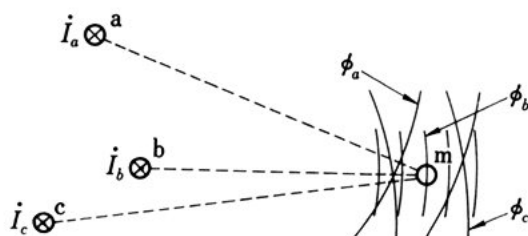
図5(a)に示すように，通信線mと送電線a，b，cが，長距離にわたって近接していると，通信線と送電線各線との間の静電容量 C_{am}，C_{bm}，C_{cm} の不平衡の影響が大きくなり，送電線電圧が対称三相電圧であっても，通信線に電圧が誘導され，電流が流れて通信障害を生じる。これを**静電誘導障害**という。

同様に，図5(b)のように，送電線各線の電流による磁束 ϕ_a，ϕ_b，ϕ_c の不平衡によっても，通信障害を生じる。これを**電磁誘導障害**という。

これらの誘導障害を軽減するには，次に示す対策を講じる。

1) 送電線路と通信線路の間隔を大きくする。

2) 送電線をじゅうぶんにねん架する。

図5 誘 導 障 害

(a) 通信線と送電線各線との間の静電容量

(b) 通信線に対する送電線各電流による磁束

3) 通信線路にしゃへい線を設ける。

4) 抵抗接地や消弧リアクトル接地にして，地絡電流を制限する。

5) 故障電線路を迅速，確実に遮断する。

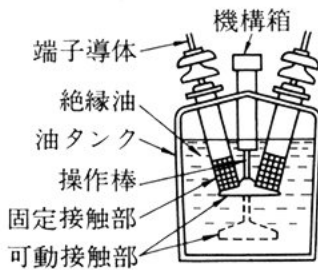
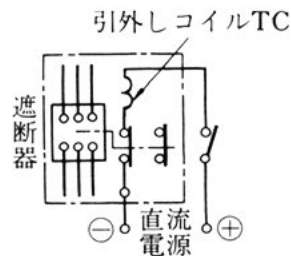
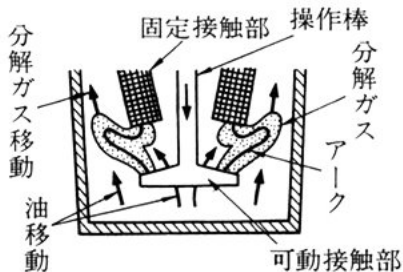
問 6. 誘導障害の軽減法を挙げ，それらを説明せよ。

5 **問 7**. 送電線路の故障時に，大きな誘導障害が生じる。これについて説明せよ。

問 8. 接地方式と誘導障害の関係を調べよ。

3. 送電線路の保護

送電線路に短絡・接地などの事故が生じたとき，直ちに回路を遮
10 断し，事故の拡大を防いで，電線路や機器を保護する必要がある。

図 6 油遮断器

(a) 構　造　(b) 電気回路　(c) 消　弧　(d) 外　観

（1）遮　断　器

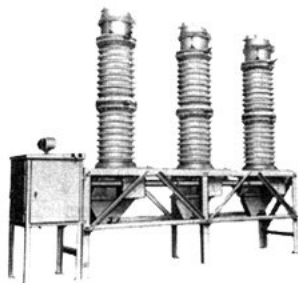
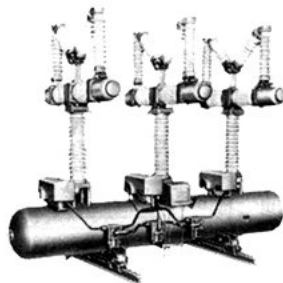
遮断器は，送電線路の運転・停止，故障電流の遮断など，高電圧・大電流の回路の開閉に用いる装置であり，遮断時に発生するアークを早く，確実に消弧するために，特別の工夫がなされている。

油遮断器　図6(a)の機構箱に内蔵されている引外し(ひきはず)コイル（図(b)）を励磁すると，引外し装置が動作し，可動接触部が開いて固定接触部から離れる。このとき，アークが発生して，油を分解し，分解ガスによって消弧する（図(c)）。油遮断器は，鉄製のタンクに満たした絶縁油によって対地絶縁を保つ。

がいし形遮断器　図7(a)のがいし形遮断器は，がいしにより対地絶縁を保ち，油は消弧に必要な量だけにしてある。特別高圧（7[kV]）以上の回路に広く用いられる。

空気遮断器　図7(b)の空気遮断器は，タンクに蓄えた圧縮空気をアークに吹き付けて消弧する。超高圧，大容量遮断に多く用いられる。

ガス遮断器　消弧能力の高い圧縮ガス（六ふっ化硫黄 SF_6）をアークに吹き付けて消弧する。空気遮断器より優れた消弧特性をもっており，超高圧・大容量遮断器として作られている。

図7　遮断器の例

(a)　がいし形遮断器

(b)　空気遮断器

真空遮断器　真空中で接点を開閉する遮断器で，構造が簡単である。アークによって生じるイオンは，空気中を速やかに拡散して，自力消弧をする。

問 9.　油遮断器と空気遮断器とはどんな点が違うか。

5　**(2) 保護継電器**

保護継電器は，送電線路・発電機などに事故が生じたとき，自動的に事故を検出し，故障の位置・種類などを識別して，遮断器を動作させる装置である。

過電流継電器　次ページの図 8 (a) において，変流器 CT からの
10　電流 i [A] がある値（整定された値）を超えると，電流コイルによって駆動される円板が回転し，これと連動する可動接点が，固定接点と接触して引外しコイル TC (trip coil) を励磁するため，遮断器が働き，回路を遮断する。

逆電力継電器　図 8 (b) において，**過電流要素**は，過電流を検出
15　する。**方向要素**は，その回転円板が，電圧・電流コイルによって駆動されるため，電流の向きを識別する。方向要素の電流コイルを流れる電流の向きによって，方向要素接点 ② は左右のどちらかに動作し，接点 ① または ③ と接触する。電流要素接点は，過電流要素に過電流が流れると閉じる。これら二つの接点は，直列になっている
20　ため整定された値以上の電流 i が，図示の向きに流れると，接点 ② は ① と接触して引外しコイル TC_1 を励磁し，遮断器を開く。電流 i の向きが変わると，接点 ② は ③ と接触して引外しコイル TC_2 を励磁する。図 8 (b) の継電器は，**逆電力継電器**とよばれ，並行 2 回線送電線路に図示の ④，④′ と ⑤，⑤′ で事故が起きたとき，故障回線を
25　選択遮断するのに広く用いられている。

(a) 過電流継電器接続図

(b) 逆電力継電器

図8 保護継電器

(3) 送電線路の保護方式

送電系統に事故が発生しても，停電防止や電線路・機器の保護のため，保護継電器や遮断器の機能により，高速度でその故障回線を検出して切り離す必要がある。その故障回線を遮断するまでの間，瞬時的に電圧が低下することがある。この瞬時電圧低下を**瞬断**という。

瞬時電圧低下の発生原因の大半は雷によるものであるが，電圧低下時間は特別高圧で0.2秒以下，高圧系統で0.3秒以下である。

（a） 故障電流の流れ　　（b） 遮断器④を開放後の故障電流の流れ

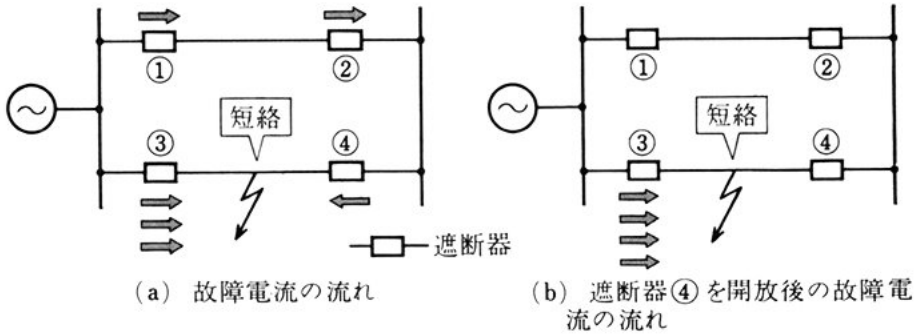



図 9 並行 2 回線送電線路の短絡保護

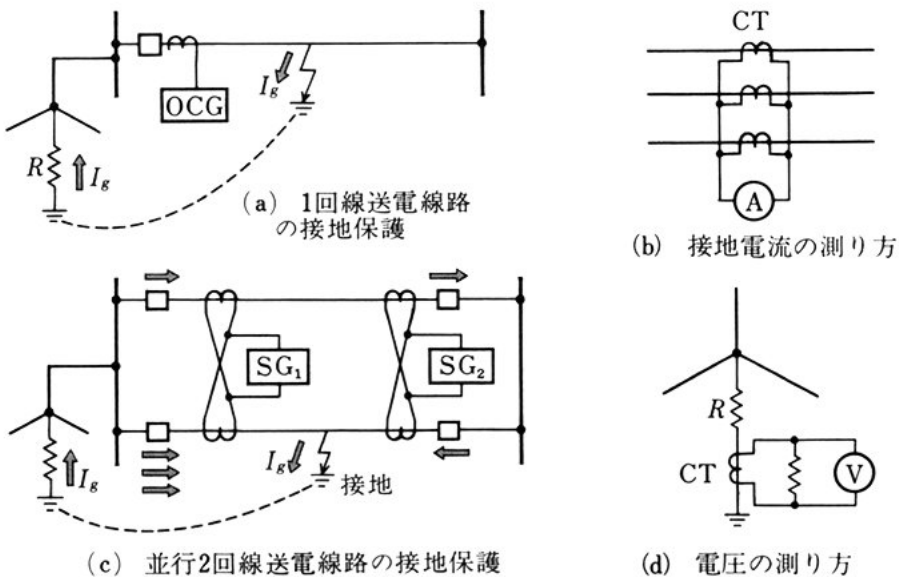
並行 2 回線送電線路の短絡保護　図 9 (a) のように，一つの回線の中央部で短絡事故が発生すると，短絡電流は，両回線を図のように 3：1 の割合で流れるから，受電端では，電力が逆流するようになる。それで受電端には電流の向きを識別できる電力継電器を設置して，遮断器 ④ を動作させ，回路を遮断する。この結果，短絡電流は，図 (b) のように流れることになるが，送電端では，電力の逆流は生じないから，両回線の不平衡電流によって選択動作をする過電流継電器により，遮断器 ③ を開き，短絡回線を切り離す。

図 10 接 地 保 護

（a） 1回線送電線路の接地保護

（c） 並行2回線送電線路の接地保護

（b） 接地電流の測り方

（d） 電圧の測り方

接地保護　図10(a)に示す抵抗接地式の送電線路の接地電流 I_g は，充電電流を無視すると，図に示すように流れるから，地絡過電流継電器OCGによって回路を遮断する。接地電流は各相同相に分流するから，変流器CTを図(b)に示すように接続して，接地電流を測る。

並行2回線送電線路では，接地電流は，両回線を図(c)に示すように流れるから，地絡回線選択継電器(逆電力継電器をこの働きに使用している)SGを送・受電端に設置して，短絡保護と同じように選択遮断する。逆電力継電器の方向要素に供給する電圧は，図(d)に示すように,変流器CTの二次側に抵抗を接続し,その電圧降下を利用する。

問10. 図9において，受電端で短絡が生じたとき，故障回線はどのようにして除去されるか。

4. 変　電　所

変電所は，送電電圧を変えたり，電力を需要場所に配分したりするところで，いろいろな機器が設備されている。

(1) 変電所の種類

電力が需要場所に到達するまでには，いくつかの変電所を経ている。これらの変電所を電力系統上の位置や用途によって分類すると，表2および表3となる。

電力系統の運転は，変電所の監視制御によって行われるが，配電用変電所には，機器を自動化し，無人化を図った遠隔監視制御変電所がある。常時監視制御変電所（親変電所ともいう）と，無人化変電所との間に監視制御用のケーブルを設け，遠方制御によって変電所の監視，機器の制御操作ができるようにしたものである。

表 2 電力系統上の分類

変電所名	変圧段階（公称電圧）
超高圧変電所	275 [kV] から 154 [kV] に降圧
一次変電所	154 [kV] から 77～66 [kV] に降圧
二次変電所	77～66 [kV] から 33～22 [kV] に降圧
三次変電所	77～22 [kV] から 6.6～3.3 [kV] に降圧

表 3 用途上の主な分類

変電所名	用　途
送電変電所	電力送電用(昇圧用変電所)，電圧降圧用(降圧用変電所)
配電変電所	配電用
直流変電所	電鉄用，電気化学工業用
自家用変電所	大口需要家用
移動用変電所	工事用

また，都市周辺の配電用変電所として用いられるユニットサブステーションとよばれる変電所は，キュービクル（運転に必要な計器や機器類を収めた鉄製の配電箱）と変圧器を個々に組み合わせた屋外変電所である。

（2） 変電所の設備

変電所の主な設備には，変圧器（T)，避雷器（LA)，断路器（DS)，遮断器（CB)，計器用変圧器（PT)，変流器（CT）などがある。図 11 は，これらの設備の配置を示す。

主変圧器　発電所の変電所における主変圧器は，△-Y 結線とし，中性点が接地される。

その他の超高圧変電所および一次変電所における主変圧器は，Y-△結線とし，中性点が接地される。また，主変圧器の一次側に，図 12 に示すタップを設け，タップを切り換えることによって，電圧を調整できるようにしたものがある。このような主変圧器を**負荷時タップ切換装置付変圧器**という。

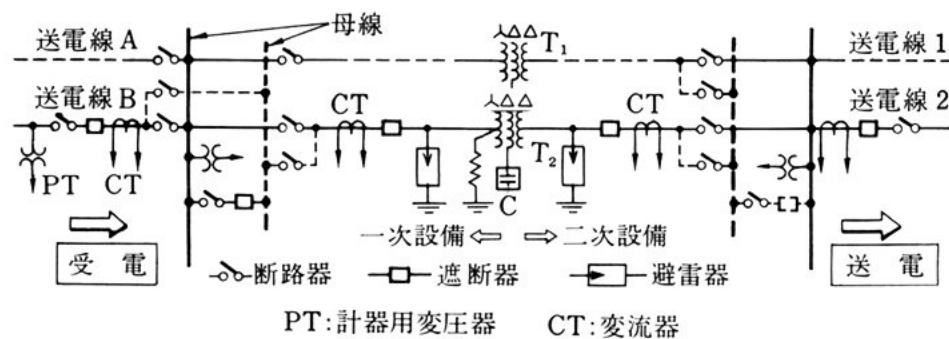
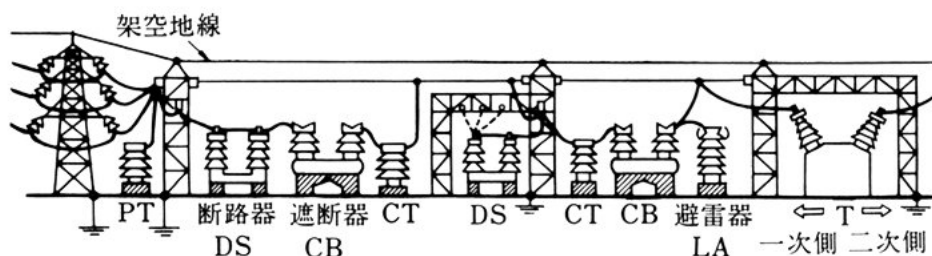
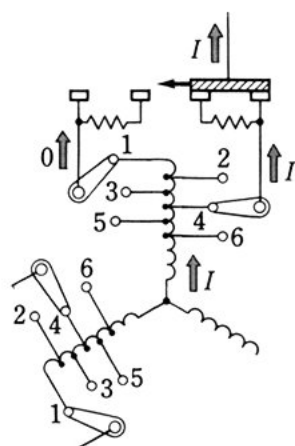
変圧器の百分率インピーダンス降下を大きくすると，電圧変動率

(a) 回路図

(b) 実体略図

図 11　変電所の主な設備

(a) タップ4に接続

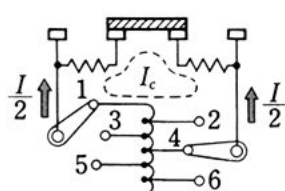
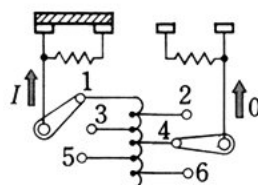
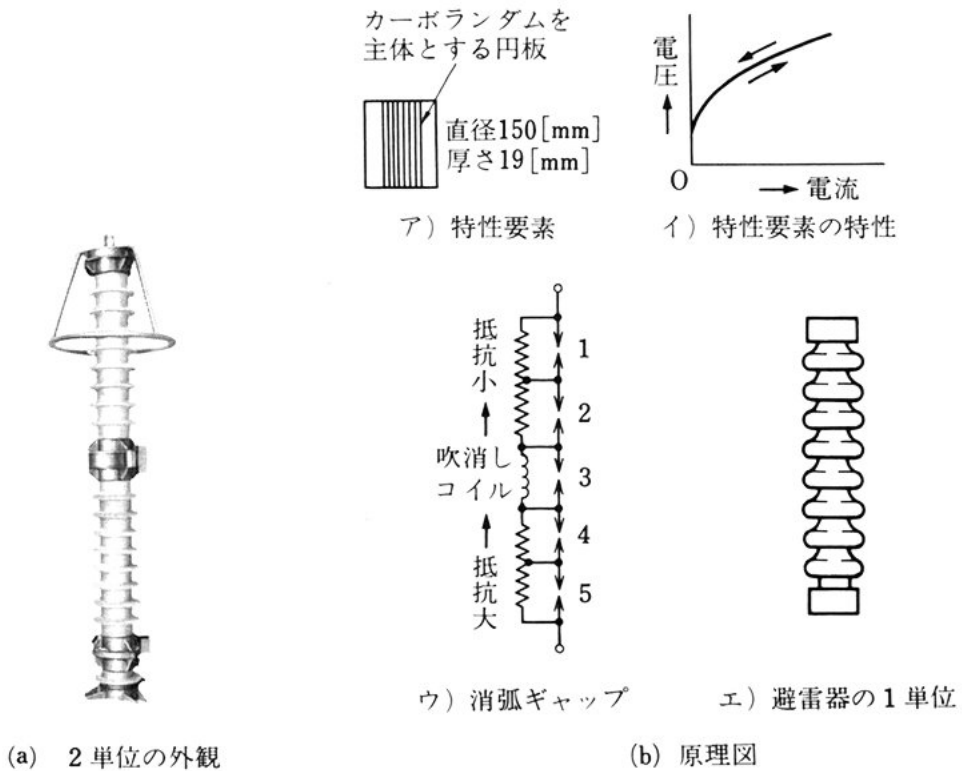
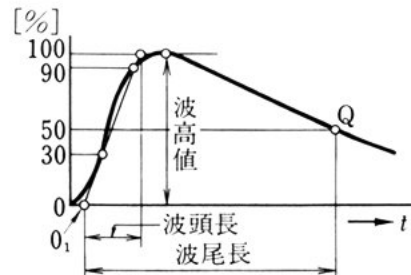



図 12　負荷時タップ切り換え

は大きくなるが，遮断器の遮断容量を小さくすることができる。そのために，定格電圧の大きな変圧器ほど百分率インピーダンス降下を大きくしてある。

避雷器　送電線路に落雷した場合，侵入する **雷電圧** * によって生じる変圧器などの機器の絶縁破壊を防ぐため，**避雷器**（LA）が設置される。図 13 は，その例である。図(b) ア）のカーボランダムを主体とする素子は，イ）に示す電圧-電流特性をもっていて，**特性要素**とよばれる。図(a)の**弁抵抗形避雷器**は，特性要素と図(b) ウ）の消弧ギャップを直列にして，それらを磁器製容器に，図(b) エ）のように密封して 1 単位とし，電圧に応じて数個積み重ねて使用する。

図 13　弁抵抗形避雷器

(a)　2 単位の外観　　(b) 原理図

*　雷電圧は，右図に示す形をしていて，途中のがいしで放電し，変電所に到達するのは，波高値 200〜500 [kV]，波頭長 1〜10 [μs]，波尾長 10〜100[μs]のものが多い。このような電圧は**衝撃電圧波**とよばれる。

雷電圧が加わると，直列ギャップの5番目のギャップに最も高い電圧が加わって（ギャップと並列になっている抵抗が最大であるから）放電し，次々にギャップが放電して短絡し，特性要素の特性曲線によって雷電圧が放電する。このときの電線の対地電圧を，避雷器の**制限電圧**という。この制限電圧に対して，ある余裕をもった高い電圧のところに**基準衝撃絶縁強度**（basic impulse insulation level : **BIL**）を設け，発電所，送電所などの全電力系統の絶縁強度を最も経済的かつ合理的に，安定度，信頼度が向上できるような値に定め，雷電圧に対する各機器の保護を行っている。これを絶縁協調という。

避雷器の設置位置，その接地抵抗値，各機器の絶縁耐力の劣化などを考慮して，BIL の値は 20～50 [%] の余裕をとって定めている。

なお，電圧が低くなると，直列ギャップの放電は，磁気吹消しコイルなどによって急速に消弧し，**続流**（dynamic current, 送電電圧による電流）は遮断される。

断路器　図11で，母線や変圧器が故障したり，または，機器を点検・修理するとき，それらを回路から切り離したり，接続がえをしたりする必要がある。このために使用するものを**断路器**（disconnecting switch : **DS**）という。

図14は，**水平2点切り断路器**とよばれるもので，各相の中央のがいしを同時に90°回転することによって，回路を切り離したり接続したりする。

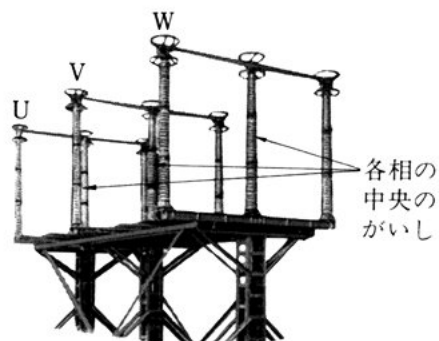



図 14　断路器（水平2点切り）

断路器は，回路を遮断するときには，遮断器を開路とし，あとで断路器を切り離す。回路を閉じるときは，その逆の順序で操作する。

計器用変成器　送電・変電の運転状態を監視するため，配電盤が設備され，電圧計・電流計などの計器類が装備される。また，送電線や機器の保護のため，継電器が用いられる。これらの計器や継電器を動作させるのは，電線路の電圧・電流であるから，必要な箇所に計器用変圧器・変流器が設置される。図 15 は，これらの外観である。

(a) 計器用変圧器 (PT)

(b) 変流器 (CT)

図 15 計器用変成器

問 11． 避雷器の原理とその働きを述べよ。

問　　題

1． 113 ページ図 2(a)から，極限受電電力 P_{rm} は，$P_{rm} \fallingdotseq \dfrac{V_{s1}V_{r1}}{x}$ になることを示せ。ただし，電線のインピーダンスは $\dot{Z}=r+jx$ とし，$r \ll x$ とする。また，$V_{s1}=66$ [kV]，$V_{r1}=60$ [kV]，$x=60$ [Ω] のとき，P_{rm} はいくらか。

2． 送電線路用機器の絶縁耐力を合理的，経済的に定めるには，次のいずれを基準にすればよいか。

(1) 直撃雷電圧（50～1000 [kV] のものがある）

(2) 避雷器の制限電圧

3． 図 16 の右の部分は，接地変圧器で，一次側は左の部分の非接地送電線に接続された Y 結線であり，二次側は開いた△結線となっている。正常時は，二次側の各相電圧は $\dfrac{110}{\sqrt{3}}$ [V] であるが，対称であるため，電圧計の指針はふれない。c 相が完全に接地したら，各相の二次電圧はそれぞれいくらになるか。また，電圧計の読みは何ボルトか。

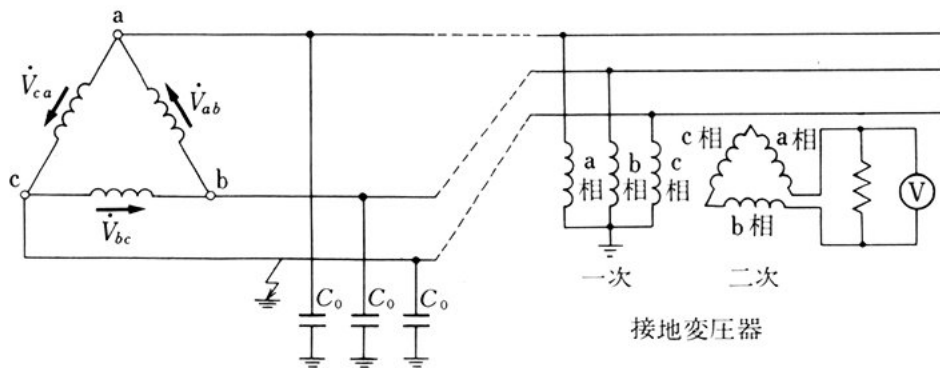



図 16

4.　図17は，選択接地継電器の接続図である。122ページの図8(b)，123ページの図10(c)を参考にして接続図を完成せよ。

5.　123ページの図10(c)の送電線が，送電端の近くで接地事故を起こしたときの継電器動作を，図17から調べよ。

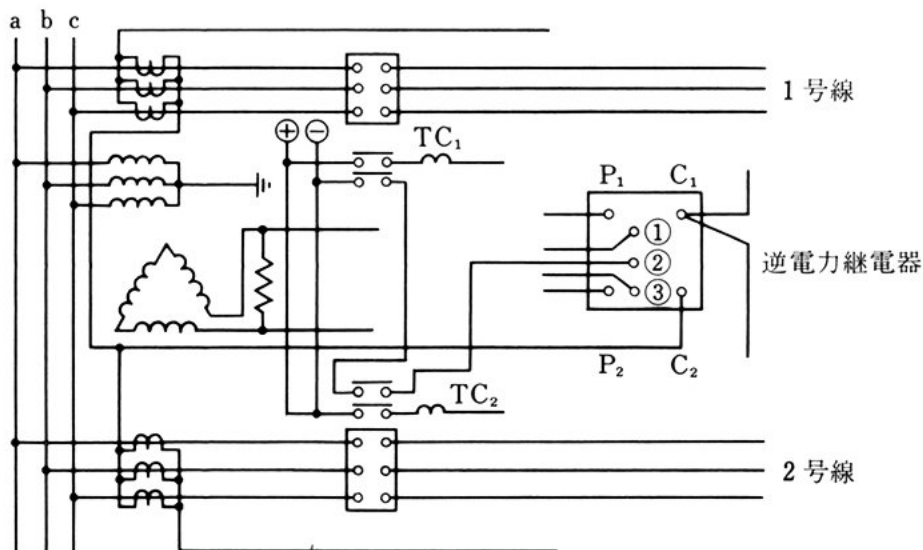
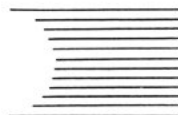
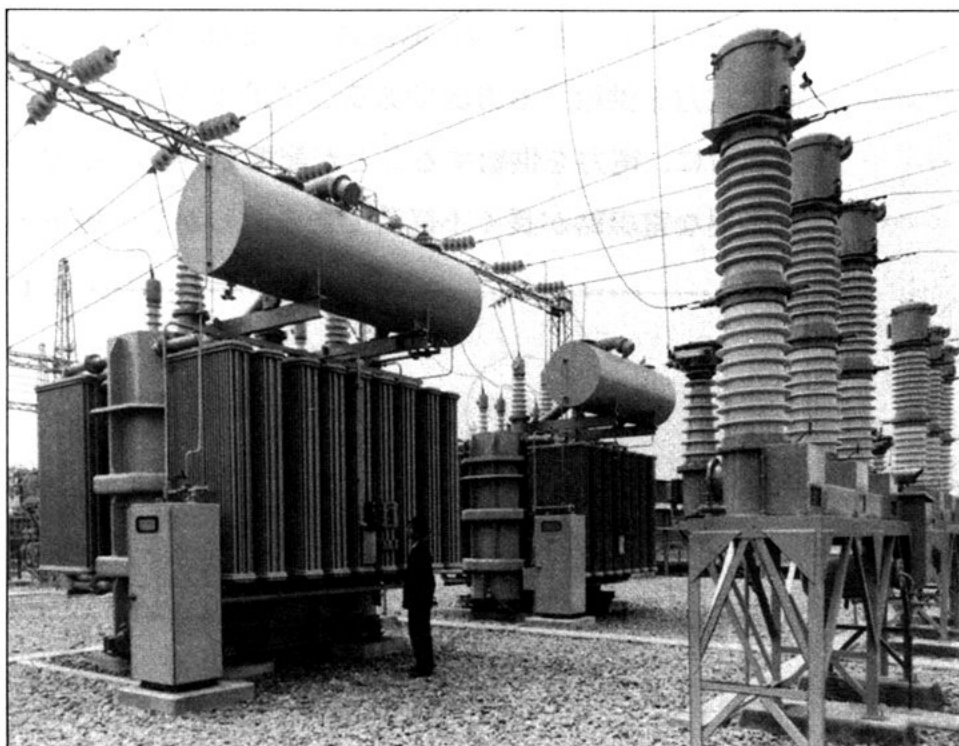



図 17

第10章

配　電

配電変電所から各需要家に電力を供給する電線路を配電線路という。配電線路には，架空配電線路と地中配電線路がある。

この章では，配電系統の構成，供給設備容量，配電器材，および保護・保安について学ぶ。また，配電線路の電気的特性を調べるとともに，効率的運用について理解を深める。

配電変電所

1 配電系統の構成

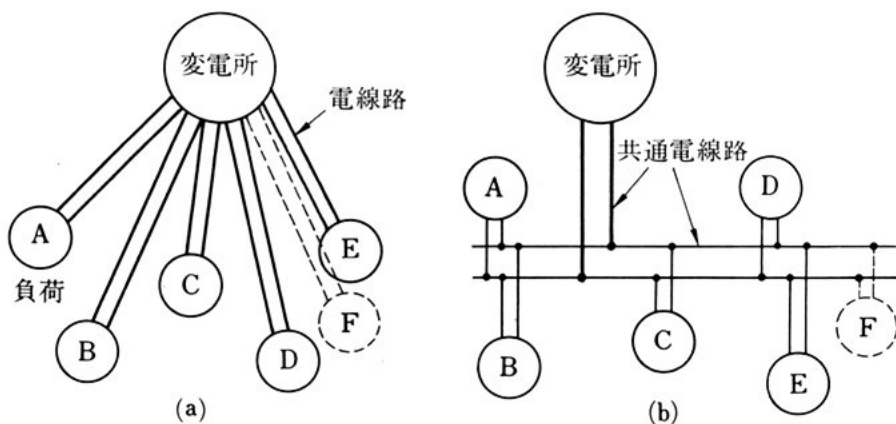
この節の目標　配電線路には，木柱・鉄筋コンクリート柱などによって電線路を架設する架空配電線路と，ケーブルを地中に埋設する地中配電線路とがある。また，これらの電線路は，使用電圧によって，高圧配電線路と低圧配電線路に分けられる。

ここでは，配電線路の構成，配電計画および保護装置などについて調べ，配電系統の構成と保安について学ぶ。

1. 配電線路の構成

（1） 配電のしかた

図1(a)は，変電所から各地に散在する負荷に，直接電力を供給する方法であり，図(b)は，電線路のある部分を共通に利用して，各負荷に電力を供給する方法である。このように，いろいろな場所にある負荷に，電力を供給することが**配電**である。図(a)の方法は，配電に必要な電線路が長く不経済である。しかし，停電の範囲は，最小

図1 配電の方法

限にとどめることができる。これに対して，図(b)の方法は，事故が生じた場合，停電の範囲が広くなるが，費用が少なくてすみ，定電圧の配電が容易である。

それで，一般に，配電には図(b)の方法が広く用いられている。

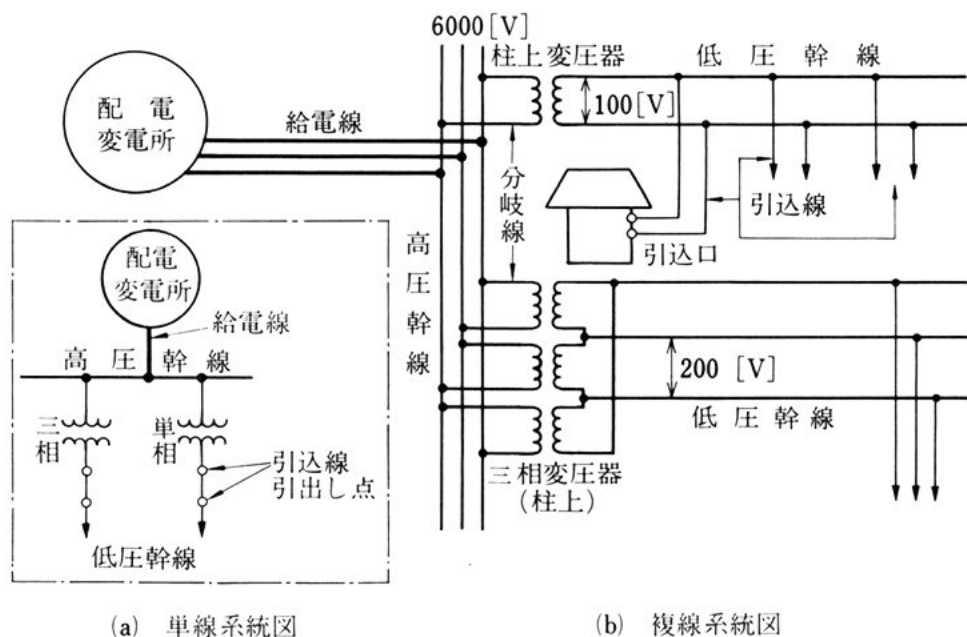
問 1. 図1において，負荷DとEの中間地点に，他の負荷Fがある場合，図(a)，(b)のどちらの方法が経済的か。

(2) 配電系統の構成

配電変電所から，家庭などの負荷に至る電線路は，図2のような配電系統図で示される。図(a)は単線系統図であり，図(b)は複線系統図である。

配電系統は，柱上変圧器を境にして，高圧配電線と低圧配電線に分けられる。**高圧配電線**は，給電線・高圧幹線および，分岐線などから構成され，**低圧配電線**は，低圧幹線と引込線から構成される。な

図 2 配電系統図

(a) 単線系統図　　(b) 複線系統図

お，柱上変圧器は，負荷の近くに設置する。

給電線　図2に示すように，変電所から配電の幹になる線に至るまでの，負荷を接続しない電線部分を**給電線** (feeder) という。この給電線は配電線路として最も重要な部分であるから，架空電線よりも信頼性の高い地中ケーブルや，ケーブルを架設して用いる架空ケーブルなどが多く用いられる。

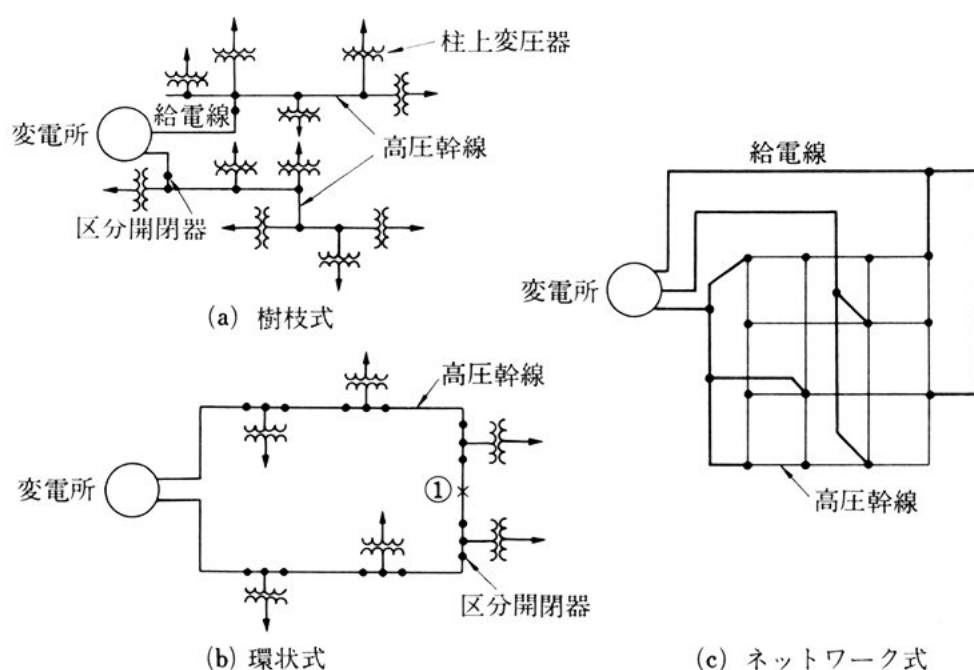
高圧幹線　図2に示すように，給電線に接続しており，需要地点において，負荷の分布の状態に従って配電し，また分岐線を出して配電を行う配電線路中の主要な部分を**幹線** (main line) という。これには，図3に示す三つの方式がある。

図(a)の**樹枝式幹線**は，負荷の増設がしやすく，設備費も安いので，最も多く用いられているが，変電所に近い場所で事故が起こると，全面的に停電するという欠点がある。

図(b)の**環状式幹線**では，2方向から電力が供給できるので，電線

図3　高圧幹線の例

(a) 樹枝式

(b) 環状式

(c) ネットワーク式

路の途中，例えば，点①で事故が起こっても，その区間だけを電線路から切り離して両側から電力を供給すれば，停電範囲は限定される。また，このほか，電圧降下や電力損失も少ないなどの利点がある。しかし，設備費が高くなるので，都市などのように，負荷が密集している地域以外には採用されない。

図(c)の**ネットワーク式幹線**は，環状式を多く結合し，網の目のようにしたもので，ほとんど停電することはない。

分岐線　図2に示すように，幹線から分かれて，柱上変圧器の一次巻線までの配電線を**分岐線**という。この分岐線までが高圧配電線である。

引込線　図2で，低圧幹線から分岐して引込口までの電線路を**引込線**という。したがって，柱上変圧器の二次巻線から引込線までが低圧配電線である。

問 2.　給電線と幹線の違いについて説明せよ。
問 3.　樹枝式幹線と環状式幹線の利点と欠点を述べよ。
問 4.　ネットワーク式が大都市に用いられる理由は何か。

(3)　電気方式と配電電圧

配電線は，電気化学工業・製鉄所・電気鉄道などのような特別な場合のほかは，高圧配電線と低圧配電線を考えればよい。

高圧配電線　高圧配電線は，図4に示す三相三線式が多く用いられており，変電所の出口の電圧は6600 [V]，使用地点の変圧器の一次側の電圧は6000 [V] を標準にしている。

低圧配電線　電灯や小形電気機器類には，単相二線式100 [V]，単相三線式100/200 [V] が用いられ，一般の動力には，三相三線式200 [V] が標準になっている（185ページ参照）。

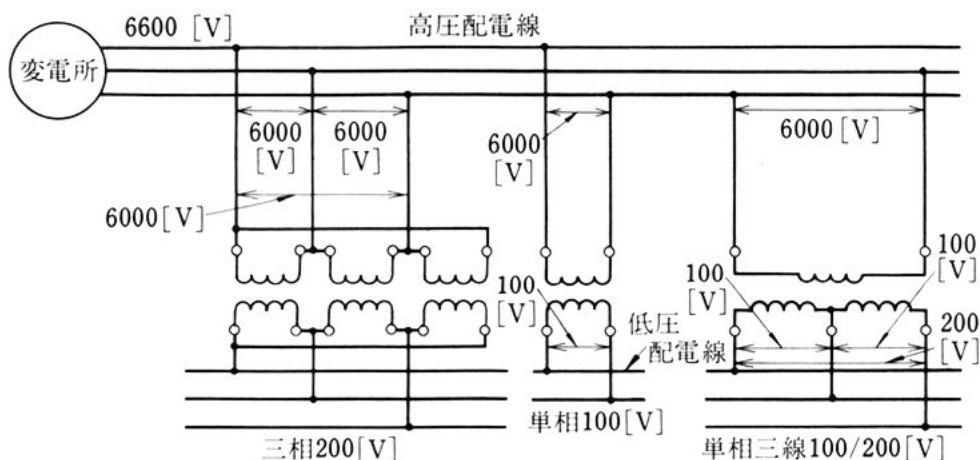



図4 電気方式と配電電圧

問5． 高圧配電線と低圧配電線は，配電線路のどこで区分されるか。

問6． 配電系統を計画するとき，重要な点は何か。

問7． 配電電圧は，従来は3000［V］であったが，電力損失の軽減などから，近年6000［V］に上昇された。同一電力を送る場合，電圧が2倍になると，電力損失はもとの何倍になるか。

2．供給設備容量

（1） 需要設備と供給設備

発電所で発生した電気は，送電線路や配電線路によって，家庭や工場に送られ，電灯・電熱器・電気動力機器や電気化学用などに消費されている。電気の使用者は，その使用電力量に応じて電気料金を電力会社に支払っている。

この場合，電気を売る側の電力会社を**供給者**といい，電気を買って使用する側を**需要家**という。また，図5(a)のように，電気を供給するための変圧器などを**供給設備**といい，電気を使用するための設備，例えば，屋内配線・電灯などを**需要設備**という。なお，一つの

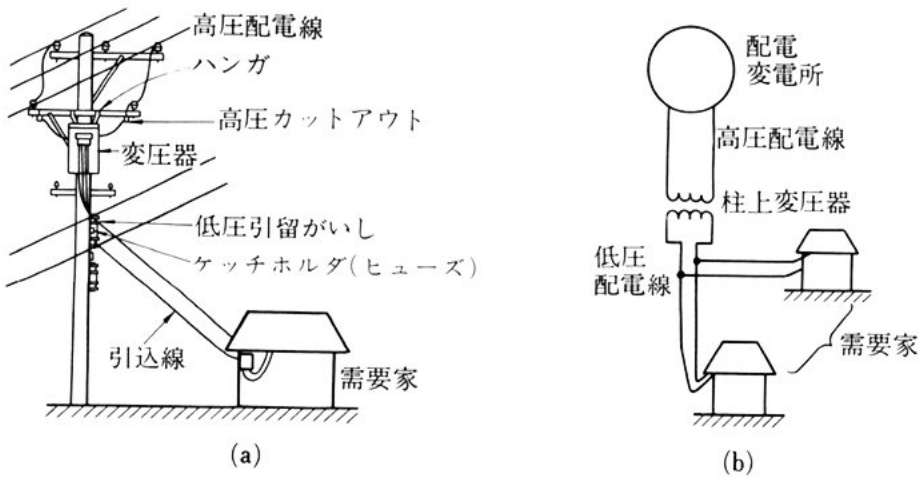



図 5 需要設備と供給設備

送配電系統において，ある点からみた電源側を**供給側**，負荷側を**需要側**という。

問 8. 図5(b)の柱上変圧器は，変電所からみて，供給設備か需要設備か。

(2) 需 要 率

電力の利用は，多方面にわたっており，各種の需要設備があるが，これらの設備が，すべて同時に全負荷で使用されることはほとんどない。例えば，電灯は主として夜間に，電動機などは昼間に多く使われる。したがって，そこに設備される容量(**設備容量**)と，実際に生じる最大需要電力とは，異なる場合が多い。ここで，これらの関係を表す係数を**需要率** (demand factor) といい，次の式で表される。

$$\text{需要率}=\frac{\text{最大需要電力 [kW]}}{\text{設備容量 [kW]}}\times 100 \quad [\%] \qquad (1)$$

需要率は，ふつう100[%]以下であり，測定期間を1日，1月または1年にするかで，その値は異なるが，一般に，1年について測定した年間最大需要電力が用いられる。

表1は，日本全国について調査した，電灯需要家の需要率である。

表 1 電灯需要家の需要率と負荷率

種別		需要率[%]	日負荷率[%]
定額電灯*		90.0	49.4
従量電灯	住宅	49.7	28.7
	商店 一般	67.9	37.3
	商店 特殊	57.4	33.8
	工場	54.4	33.9
	事務所	45.5	33.4
大口電力		52.9	38.9

* 使用電力量の多少に関係なく，需要電力または需要設備容量によって電気料金を定めるもので，400[VA]以下の小規模な電灯需要家に適用される契約方式のこと。

（「電気学会技術報告15号」による）

需要率がわかれば，設備容量に対する最大需要電力が算出でき，これから，供給容量がわかる。

問 9. 住宅の最大需要電力が5[kW]で需要率が60[%]である場合の設備容量はいくらか。

問 10. 電灯負荷の設備容量の合計が1000[kW]の工場がある。これに電力を供給するのに必要な変圧器の容量を，表1を参考にして求めよ。

（3） 不等率

一つの配電変圧器からみた需要家群や，給電線からみた配電変圧器群などにおいて，個々の需要設備の最大需要電力は，同じ時刻には起こらない。したがって，時刻を無視した各需要家個々の最大需要電力を合計したものは，全体を総合した合成最大需要電力より必ず大きくなる。この割合を示すものを需要家相互間の**不等率**（diversity factor）といい，次の式で表される。

$$不等率=\frac{需要設備個々の最大需要電力の合計[kW]}{合成最大需要電力[kW]} \quad (2)$$

表2は，不等率の例である。この不等率がわかれば，その系統の合成最大需要電力がわかり，その群に必要な**変圧器容量**が決定できる。

表2 不　等　率

需要種別	不等率
電灯負荷相互間（定額電灯）	1.07
電灯負荷相互間（従量電灯）	1.45
小口電力電熱負荷相互間	1.58
特高需要家相互間	1.15
配電変電所における各需要家間	1.33
配電変電所相互間	1.04
低圧配電線間（繁華街）	1.07
低圧配電線間（住宅地）	1.20
低圧配電線間（工場地）	1.29

（電気学会編「電気工学ハンドブック」による）

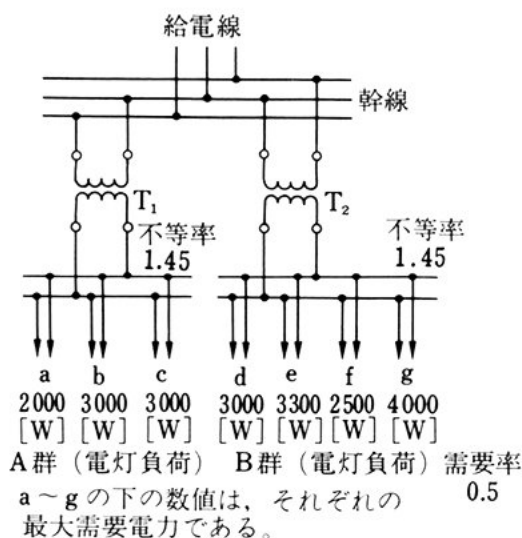



図6　変圧器容量の決め方

例題 1.　図6において，A群の変圧器 T_1 の容量はいくらか。

解答　T_1 の合成最大需要電力 $=\dfrac{各需要家の最大需要電力の総和}{不等率}$

$$=\frac{2000\times0.5+3000\times0.5+3000\times0.5}{1.45}$$

$$=2759\,[\mathrm{W}]$$

電灯負荷であるから，負荷力率は1であり，T_1 の変圧器容量は2759 [VA] になる。したがって，定格容量3 [kVA] の変圧器が必要となる。

問 11.　図6において，B群の変圧器の定格容量はいくらか。

問 12.　次の表の負荷設備の合成最大需要電力 [kW] はいくらか。

負荷設備	需要率	不等率
60 [W] 白熱電灯 80 灯	0.8	1.2
1.2 [kW] 電熱器 5 台	0.6	

（4）負　荷　率

変電所や需要家における電力の使用状態は，時刻や季節によってかなり変わる。図 7 は 1 日の各時刻における電力使用のようすを表す日負荷曲線の例である。このような電力需要の変動の程度を表すのに，**負荷率** (load factor) が用いられる。負荷率は次の式で表される。

$$負荷率 = \frac{平均需要電力\ [\mathrm{kW}]}{最大需要電力\ [\mathrm{kW}]} \times 100 \quad [\%] \qquad (3)$$

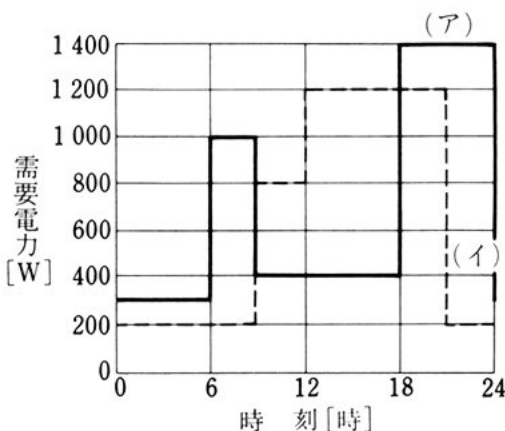



図 7　日負荷曲線の例

表 3　変圧器の負荷率

種別		日負荷率
大都市	住宅地域	39.7
	住宅・工場地域	40.6
	住宅・商店地域	39.2
	商店街	44.6
市制地区	住宅地域	40.0
	住宅・工場地域	43.0
	住宅・商店地域	41.5
	商店街	43.1
農村		42.6

(「電気学会技術報告 15 号」による)

例題 2.　図 7 の実線で示す日負荷曲線（ア）の負荷率を求めよ。

解答　$平均需要電力 = \frac{300 \times 6 + 1000 \times 3 + 400 \times 9 + 1400 \times 6}{24}$

$$=\frac{16800}{24}=700\ [\mathrm{W}]$$

$$負荷率=\frac{平均需要電力}{最大需要電力}\times 100$$

$$=\frac{700}{1400}\times 100=50\ [\%]$$

この例題の場合，電力会社としては，最大需要電力に応じられるだけの設備容量 1400 [W] を用意しているのに，実際には，毎時間平均 700 [W] の電力しか利用されなかったことを示している。

問 13． 図7の破線で示す日負荷曲線（イ）の負荷率を求めよ。また，負荷率の大小は何を意味するか。

問 14． ある工場の最大需要電力が 900 [kW]，総合力率が 90 [%]，需要率が 65 [%] であるという。この工場の設備容量 [kVA] はいくらか。

問 15． 10 [kW]，200 [V] の三相誘導電動機の1日の使用電力量が 80 [kW•h] で，最大使用電力が 8 [kW] である。負荷率を求めよ。

3. 配電線路の機器と材料

(1) 架空配電線路

架空配電線路は，電線，それを絶縁するがいし，電線を支える電柱などの支持物，変圧器などで構成されている。

支持物　架空配電線路に用いられる支持物には，鉄筋コンクリート柱・木柱などがある。木柱は，細い方を**末口**，根元の方を**元口**という。木柱の大きさは，長さ [m] と末口の直径 [cm] で表され，長さが 7～16 [m]，末口の直径 13 [cm] 以上のものが使われている。

耐用年数を長くするために，クレオソート・マレニットなどの防

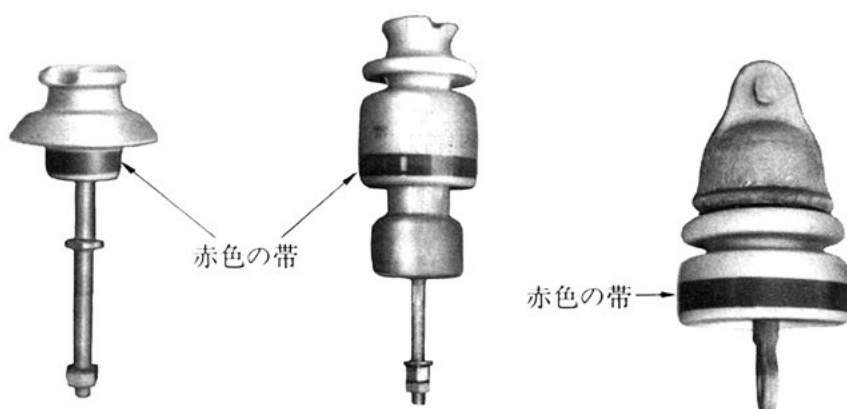
赤色の帯

(a)　高圧ピンがいし　(b)　中実がいし　(c)　高圧耐張がいし

図 8　各種の高圧がいし

腐剤を注入した木柱は**注入柱**とよばれ，注入柱は防腐処理が施されていない不注入柱に比べて，期間使用が2倍になる。

鉄筋コンクリート柱は，長さ12〜16［m］，末口の直径19［cm］以上のものが用いられ，耐用年数は半永久的である。入手が容易であるなどのため，多く用いられている。

がいし　がいしは，電線と支持物を絶縁するために用いるもので，ひび・き裂などがなく，堅ろうで絶縁耐力の高いことが必要である。がいしには，使用電圧によって，**高圧がいし**と**低圧がいし**がある。高圧がいしには，低圧がいしと区別するために，表面に幅1.5［cm］以上の赤色の帯状の表示を施してある。

また，使用目的によって，図8に示す**高圧ピンがいし**・**中実がいし**・**高圧耐張がいし**などがある。

電　線　架空配電線路の電線には，絶縁電線・多心型電線* またはケーブルが用いられている。電線の太さは，電圧降下・電力損失・許容電流および機械的な強さなどを考慮して決める。電線の最

* 絶縁物で被覆した導線を1本の裸導線のまわりに，あるピッチでらせん状に巻き付けた電線を**多心型電線**という。

表 4　硬銅線の最小太さ（直径）

場所	種類＼電圧の区分	低圧 300 [V] 以下	低圧 300 [V] 超過	高　圧
市 街 地	多心型電線	3.2 [mm] 以上		
	絶縁電線	2.6 [mm] 以上	5 [mm] 以上	5 [mm] 以上
市街地外	多心型電線	3.2 [mm] 以上		
	絶縁電線	2.6 [mm] 以上	4 [mm] 以上	4 [mm] 以上

（「電気設備技術基準第 72 条」による）

小太さは，電気設備技術基準に定められている。表 4 は，その例である。

柱上変圧器　高圧配電線路の電圧を低圧に変えて，需要家に供給する変圧器で，電柱上に置かれるので，**柱上変圧器**とよばれる。一般に，単相用の 10～100 [kVA] のものが多く使用されている。

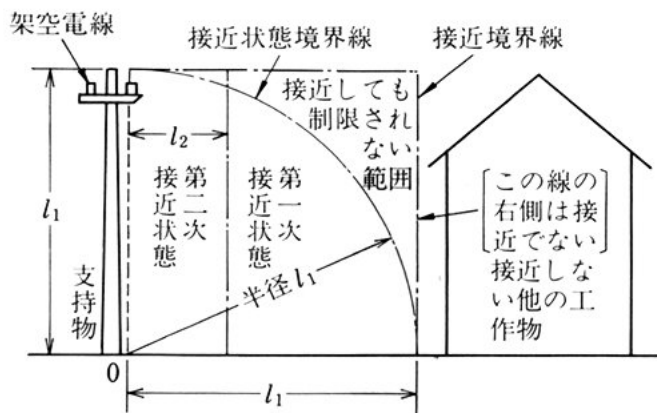
架空配電線路の建設　架空配電線路は，建造物に接近したり，弱電流電線*・鉄道・道路などを横断して建設されることがある。したがって，架空電線が切れたり，支持物が倒れたときの事故や災害の発生を防ぐために，配電線路の建設のさい図 9 に示す**他の工作物との接近状態****についての規程がある。

l_1: 支持物の地表上の高さ，l_2: 3 [m]

図 9　接 近 状 態

*　電話線に用いる電線やケーブルである。

**　電気設備技術基準第 1 条の 22，23，24。

架空電線が，他の工作物の上方または側方にあって，電線が他の工作物に接触するおそれがある場合を**第二次接近状態**という。

また，電線の切断や支持物の倒壊などによって，他の工作物と接触するおそれがある場合の状態を**第一次接近状態**という。

（2） 地中配電線路

地中配電線路は，架空配電線路に比べて，建設費が高く，工事・保守および，事故が生じた場合の復旧作業などが困難である。しかし，漏電・断線などによる人畜への被害が少なく，天災や人災による支持物の倒壊などの心配がない。このようなことから，地中配電線路は，次のような場合に用いられている。

1）市街地のように，とくに信頼度の高い配電線路が要求される場合

2）建造物・通信線路その他の地上物件などの関係で，架空配電

図 10　ブチルゴム絶縁クロロプレンシースケーブル

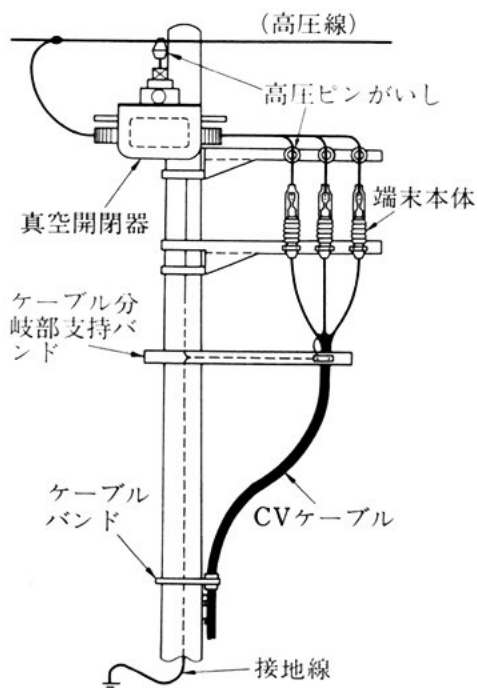



図 11　架空配電線路と地中配電線路の接続

線路の建設が困難な場合

3) 爆発性ガスその他の危険物のある場所などで，保安上架空電線路を用いることができない場合

地中配電線路は，ケーブル・変圧器塔または，配電塔などで構成されている。

ケーブル　高圧および低圧地中配電線路には，図 10 に示すブチルゴム絶縁クロロプレンシースケーブル (BN) や，架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル (CV) などが用いられている。

図 11 は，高圧受電の需要家の引込線の例である。高圧架空配電線路から分岐して，真空開閉器を経て，CV ケーブルにより，地中配電線路となり，需要家の変電室に接続されている。

変圧器塔　変圧器は，点検を容易にするため地上に置かれることがある。その場合，露出状態で使用すると，人畜に対して危険であり，保守の点からも不都合である。このため，図 12 に示す鉄製の箱に収めて設置する。これを**変圧器塔**という。変圧器塔は，道路に沿った，交通に支障のない場所に設置する。

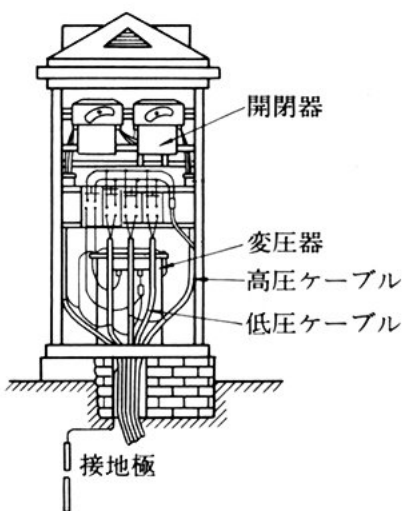
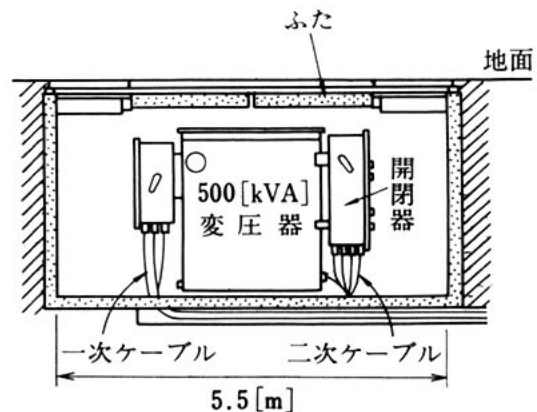



図 12　変圧器塔　　図 13　変圧器マンホール

また，都市の美観や交通に支障のある場合には，図13に示す**変圧器マンホール**が用いられる。

配電塔　配電塔は，地中線の分岐箇所に使用するもので，塔内には，断路器や気中開閉器が設置されており，ここから各需要家に配電している。

問 16. 架空配電線路および地中配電線路には，それぞれどのような利点があるか。

問 17. 変圧器塔と変圧器マンホールとはどう違うか。

問 18. 第一次接近状態とは，どのような状態か。

4. 配電線路の保護と保安

(1) 過電流保護と回路の開閉

配電線路の保護装置としては，配電変電所の継電器や遮断器があるが，柱上変圧器の保護にも，いろいろな工夫がなされている。

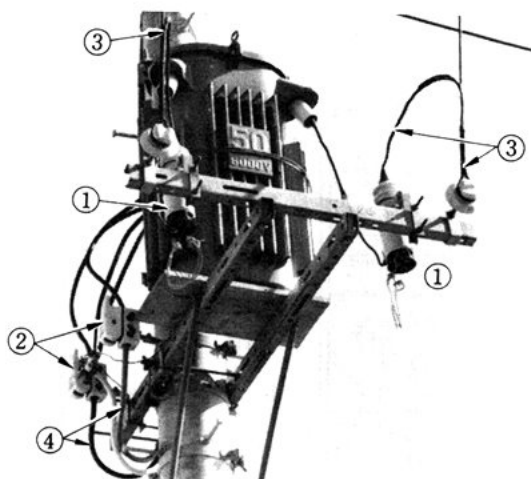
変圧器の保護　柱上変圧器には，図14に示すように，一次側には，**高圧カットアウト** (primary cut-out)，二次側には**低圧開閉器** (secondary cut-out) とよばれる器具が用いられている。

① 高圧カットアウト　② 低圧開閉器
③ 高圧線(一次側)　④ 低圧線(二次側)

図 14　柱上変圧器の例

1) 変圧器の一次巻線に，層間短絡などが生じたとき，回路を自動的に遮断するために，ヒューズが必要である。また，低圧配電線路の点検・修理などのとき，回路を遮断するために開閉器が必要である。この両機能をもっているのが**高圧カットアウト**で，変圧器の一次側の各線に用いられている。

2) **低圧開閉器**は，変圧器の二次側各線に用いられており，引込線の増設や改修工事のとき，回路を遮断するために設置されている。したがって，二次側の事故に対しては，高圧カットアウトで回路を遮断する。

区分開閉器　高圧配電線路では，電線路の部分的な補修や増設などの作業をしたり，火災その他の事故が発生したときに，その区間だけを配電線路から切り離す必要がある。そのため，電線路の必要な箇所に，真空開閉器を用いる。このような開閉器を**区分開閉器***（section switch）という。

問 19. 区分開閉器を用いると，どんな利点があるか。

問 20. 高圧カットアウトの使用目的は何か。

（2） 絶縁障害と接地

電線の絶縁がわるければ，漏れ電流による火災や，感電の危険があるので，充電部分**を大地から絶縁することは，電気工作物の重要な原則である。電気機器は，長期間の使用で絶縁が劣化し，鉄台や外箱に漏電を生じることがある。また，変圧器の故障などによって，高圧側と低圧側とが接触して低圧配電線に高圧が侵入することがある。このように，じゅうぶん注意して設備しても，上記のような危

* 電気設備技術基準第 98 条，第 98 条の 2。

** 電線路や電気機器などにおいて，電圧の加わっている部分である。

表 5　接地工事の種類・接地線の太さおよび施工場所

種　類	接地抵抗値	接地線の太さ	適用場所(機器)
第1種接地工事	10 [Ω] 以下。	直径 2.6 [mm] 以上の軟銅線。	高圧・特別高圧用の電気機械器具の鉄台および外箱。特別高圧 PT・CT の二次側。
第2種接地工事	変圧器の高圧側または特別高圧電路の1線地絡電流 (I_s) のアンペア数で 150 を除した値以下。ただし，高圧電路または 35000 [V] 以下の特別高圧電路と低圧電路との混触により，低圧電路の対地電圧が 150 [V] を超えた場合に，1秒を超え2秒以内に（特別）高圧電路を自動的に遮断する装置を設けるときは，上記のアンペア数で 300 を除した値以下とし，1秒以内に自動的に遮断する装置を設けるときには，上記のアンペア数で 600 を除した値以下とする。	直径 2.6 [mm] 以上。ただし，特別高圧を低圧に変成する変圧器の低圧側中性点を接地する場合には 4.0 [mm] 以上の軟銅線。	変圧器の低圧側の中性点または1端子。
第3種接地工事	100 [Ω] 以下。ただし，低圧電路において，地気* を生じた場合に 0.5 秒以内に自動的に電路を遮断する装置を施設するときは 500 [Ω] 以下。	直径 1.6 [mm] 以上の軟銅線。	300 [V] 以下の低圧用の電気機械器具および外箱の接地。高圧 PT・CT の二次側。
特別第3種接地工事	10 [Ω] 以下。ただし，低圧電路において，地気を生じた場合に 0.5 秒以内に自動的に電路を遮断する装置を施設するときは 500 [Ω] 以下。	直径 1.6 [mm] 以上の軟銅線。	300 [V] を超える低圧用電気機械器具の鉄台および外箱の接地。

*　地気とは漏れ電流のことであり，ここで用いる遮断装置は，漏電遮断器である。

（「電気設備技術基準第 18，19，26，28 条」による）

険が起こることがある。これによる障害を最小限に抑えるために，必要な箇所に接地を施すことが電気設備技術基準で定められている。

接地方式には，

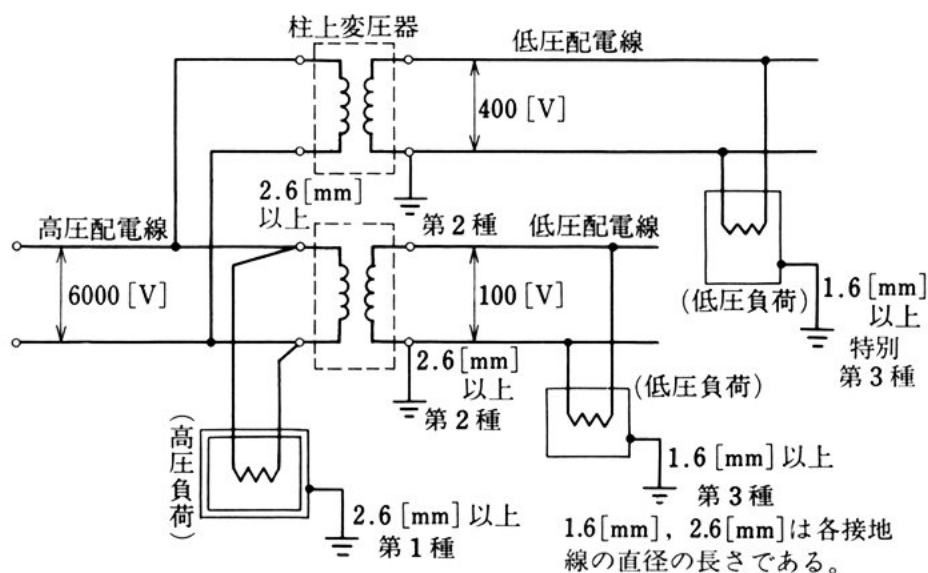
1) 常時は非充電部分であるが，事故時には，充電されるおそれのある部分に施す接地工事

2) 充電電路に施す接地工事

がある。1) に相当するのが，第1種，第3種，および特別第3種接地工事とよばれるもので，漏電による感電防止などのために行う。また，2) に相当するのが，第2種接地工事とよばれるもので，変圧器内での高低圧混触などによる危険防止のために行う。

表5は，接地工事の種類・接地線の太さおよび，接地工事施工場所などを示したものである。また，図15は，各種接地工事の施工箇所を具体的に示したものである。

接地工事の方法　第1種および第2種接地工事に使用する接地線を人が触れるおそれのある場所に施設するときは，次の方法で行

図 15 接地工事の例

わなければならない。

1)　接地極は，地下75 [cm] 以上の深さに埋設すること（図16 (ア)）。

2)　接地線を鉄柱その他金属体に沿って施設する場合は，接地極を地中でその金属体から1 [m] 以上離して埋設すること。

3)　接地線には，絶縁電線（屋外用ビニル絶縁電線を除く）・キャブタイヤケーブル，または通信用ケーブル以外のケーブルを使用すること。ただし，地表上60 [cm] を超える部分はこの限りでない。

4)　接地線の地下75 [cm] から地表上2 [m] までの部分は，電気用品取締法の適用を受ける合成樹脂管またはこれと同等以上の絶縁効力および強さのものでおおうこと（図(イ)）*。

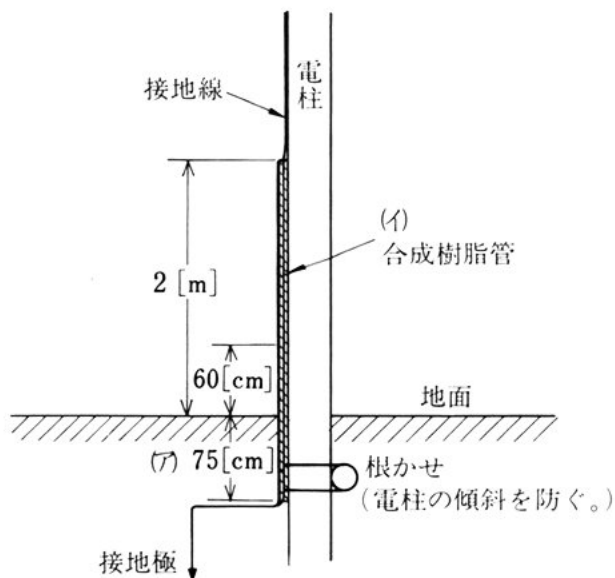



図 16　接地工事の方法

なお，地中に埋設され，さらに，大地との間の電気抵抗が3 [Ω] 以下の金属製水道管は，各種接地工事の接地板（極）として使用することができる**。

*　電気設備技術基準第19条。

**　電気設備技術基準第21条。

問 21. 接地は，何のために行うか。

問 22. 柱上変圧器の保安には，第何種の接地工事が必要か。

問 23. 200 [V] の三相誘導電動機の接地工事の種類は何か。また，接地線の太さはいくらか。

5

問　　題

1. 次の用語を説明せよ。

(1) 給電線　(2) 末口　(3) 日負荷曲線

(4) 注入柱　(5) 変圧器塔　(6) プライマリカットアウト

2. 次の機器に適切な接地工事の種別と使用電線の太さを答えよ。

10 (1) 特別高圧の PT の二次側

(2) 高圧を低圧に変成する変圧器の二次側

3. 需要率・不等率および，負荷率を求める式から，これら三つの間の関係を表す式を求めよ。

4. ある工場の設備容量が 3000 [kW] で，需要率が 0.7，不等率が 1.5

15 であるという。変圧器容量はいくらか。ただし，力率は 1 とする。

5. 図 17 に示す二つの需要家群があり，各需要家の需要率が 0.5，需要家相互間の不等率が 1.2，変圧器相互間の不等率が 1.3 である。

20 次の問いに答えよ。ただし，負荷はすべて電灯負荷とする。

(1) 各群の合成最大需要電力を求めよ。

(2) 変圧器 T_1, T_2 の定格容量はそれ

25 ぞれいくらか。

(3) 給電線に対する合成最大需要電力はいくらか。

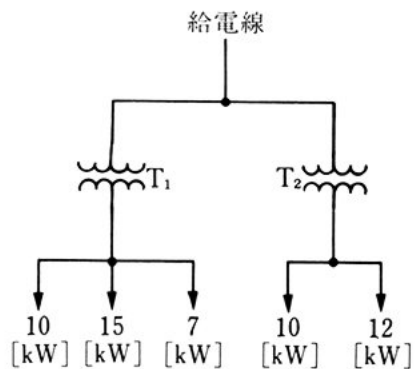



図 17

6. 発電所の1か月の発電電力量が 2500×10^6 [kW・h] で，その月の最大発電電力が 570×10^4 [kW] であった。次の問いに答えよ。

(1) 平均電力はいくらか。

(2) 月負荷率はいくらか。

7. 出力 P が 10 [kW]，電圧 V が 200 [V] の三相誘導電動機がある。ある1日における負荷実績について，次の記録を得た。1日の需要電力量 60 [kW・h]，1日の最大需要電力 8 [kW]，最大需要電力の場合における電流 I は 30 [A] である。次の問いに答えよ。

(1) 1日の負荷率はいくらか。

(2) 最大需要電力時における力率 $\cos\theta$ はいくらか。

2 配電線路の電気的特性

この節の目標　配電線路では，抵抗やインダクタンスによって，電圧降下が生じる。この電圧降下が大きくなると，需要家においては，電圧変動が大きくなり，安定した電力の使用が困難になることもある。また，配電線路の電力損失は，できるだけ小さな方がよいが，これは，需要家における，使用機器の力率に大きく影響される。ここでは，これらのことについて調べる。

1. 配電線路の電圧調整

（1） 配電線路の電圧降下

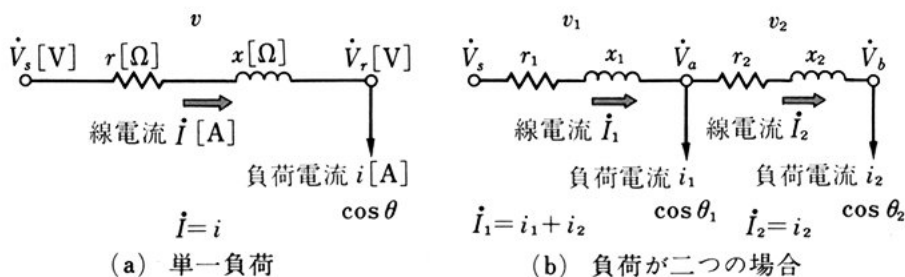
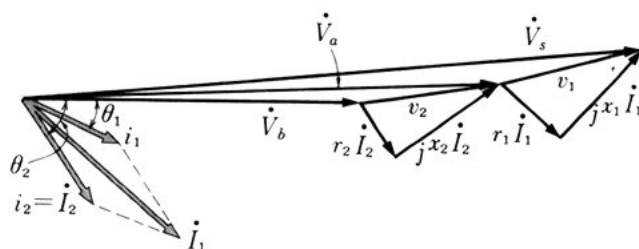
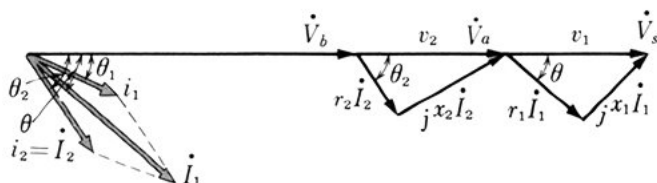
単一負荷の場合　図1(a)の単相二線式電線路において，往復2線の抵抗を r [Ω]，リアクタンスを x [Ω]，配電線路に流れる電流を I [A]，受電端電圧を V_r [V] とすると，送電端電圧 V_s [V] は，99ページで学んだように，次の式で表される。

$$V_s = V_r + (r\cos\theta + x\sin\theta)I \qquad (1)$$

したがって，この場合の電圧降下 v [V] は，次の式で表される。

$$v = V_s - V_r = (r\cos\theta + x\sin\theta)I \qquad (2)$$

図1　単相二線式配電線路

(a) 単一負荷　(b) 負荷が二つの場合

(a)　ベクトル図

(b)　簡略化したベクトル図

図 2　図1 (b) のベクトル図

多数負荷の場合　図1(b)は，負荷が二つの場合であり，そのベクトル図は，図2(a)で示される。この場合，式（1）を誘導した考え方で簡略化して考えると，近似的に，図2(b)で表すことができる。

図2(b)において，各負荷の電圧降下 v_1 [V]，v_2 [V] は，次の式で表される。

$$v_1=r_1(i_1\cos\theta_1+i_2\cos\theta_2)+x_1(i_1\sin\theta_1+i_2\sin\theta_2)$$

$$v_2=r_2i_2\cos\theta_2+x_2i_2\sin\theta_2$$

したがって，全電圧降下 v [V] は，式（3）で表される。

$$v=v_1+v_2 \qquad (3)$$

以上のことから，多数負荷の全電圧降下 v [V] は，式(4)で表される。

$$v=v_1+v_2+v_3+\cdots+v_n=\sum r\,i_a+\sum xi_r \qquad (4)$$

ただし，i_a は電流の有効分，i_r は電流の無効分である。

なお，式（4）の r および x の値は，単相二線式では往復2線の値を用いるが，三相三線式では1線分についての値を用い，式（4）

で計算した値を $\sqrt{3}$ 倍する必要がある。

電圧降下率　電圧降下 v [V] と受電端電圧 V_r [V] の比を**電圧降下率**という。したがって，電圧降下率は次の式で表される。

$$\text{電圧降下率} = \frac{v}{V_r} \times 100 = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

5　**電圧変動率**　無負荷のときの受電端電圧 V_{0r} [V] と全負荷のときの受電端電圧 V_r [V] の差と，V_r [V] との比を配電線路における**電圧変動率**という。したがって，電圧変動率は次の式で表される。

$$\text{電圧変動率} = \frac{V_{0r} - V_r}{V_r} \times 100 \quad [\%] \qquad (6)$$

例題 1.　図1 (b) において，負荷電流 $i_1 = 50$ [A]，力率 $\cos\theta_1 =$
10　0.6，負荷電流 $i_2 = 100$ [A]，力率 $\cos\theta_2 = 0.7$，往復2線の抵抗がそれぞれ $r_1 = 0.12$ [Ω]，$r_2 = 0.08$ [Ω]，往復2線のリアクタンスがそれぞれ $x_1 = 0.06$ [Ω]，$x_2 = 0.04$ [Ω] のとき，各負荷の電圧降下 v_2 [V]，v_1 [V] および全電圧降下 v [V] を求めよ。

解答　$v_2 = 0.08 \times 100 \times 0.7 + 0.04 \times 100 \times 0.71 = 8.44$ [V]
15　$v_1 = 0.12 \times (50 \times 0.6 + 100 \times 0.7) + 0.06 \times (50 \times 0.8 + 100 \times 0.71) = 18.66$ [V]
$v = v_1 + v_2 = 18.66 + 8.44 = 27.1$ [V]

問 1.　$i_1 = 50$ [A], $\cos\theta_1 = 0.6$, $i_2 = 100$ [A], $\cos\theta_2 = 0.8$ の二つの負荷が接続されている三相三線式の配電線路がある。1線の抵抗が
20　$r_1 = 0.12$ [Ω]，$r_2 = 0.06$ [Ω]，1線のリアクタンスが $x_1 = 0.06$ [Ω]，$x_2 = 0.03$ [Ω] であるという。全電圧降下 v [V] を求めよ。

問 2.　単相二線式配電線路において，受電端電圧 V_r [V] が3000 [V]，負荷の出力 P が量240 [kW]，力率 $\cos\theta$ が0.8である。往復2線の抵抗は2 [Ω]，リアクタンスは1 [Ω] である。送電端電圧 V_s
25　[V] および電圧降下率を求めよ。

問 3.　問2が三相三線式ならば，全電圧降下 v [V] はいくらになるか。

(2)　電 圧 の 調 整

送電線路と同様に配電線路においても，負荷の変動に伴って電線路の電圧降下が変化するので，受電端電圧を調整する必要がある。

変電所における電圧調整　高圧配電線路の電圧調整には，配電変電所において，誘導電圧調整器や負荷時タップ切換装置付変圧器などが用いられる。

配電線路上における電圧調整　配電線路上の電圧調整には，柱上変圧器が用いられる。配電線路の電圧降下が大きすぎる場合，柱上変圧器を図3の左側のように接続して，高圧幹線の電圧を高くして送り，さらに，需要地付近において，別の柱上変圧器を用いて，低圧にする。柱上変圧器を図3の左側に示すように接続して用いたものを**昇圧器** (booster) という。

柱上変圧器には，配電用6 [kVA] 用油入変圧器が用いられる。高圧巻線に五つのタップがある。変圧器を設置する場所の電圧によってタップを適当に選べば，低圧配電線路の電圧を規定値に保つことができる。例えば，図4の場合，二次電圧を等しくするためには，電源から遠く離れている変圧器ほど巻数比が小さくなるようなタッ

図3 昇　圧　器

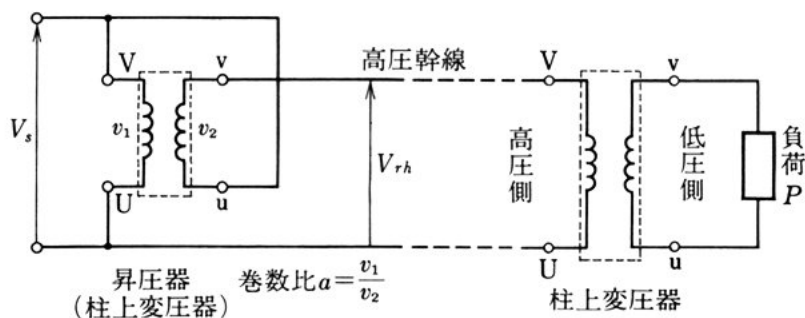
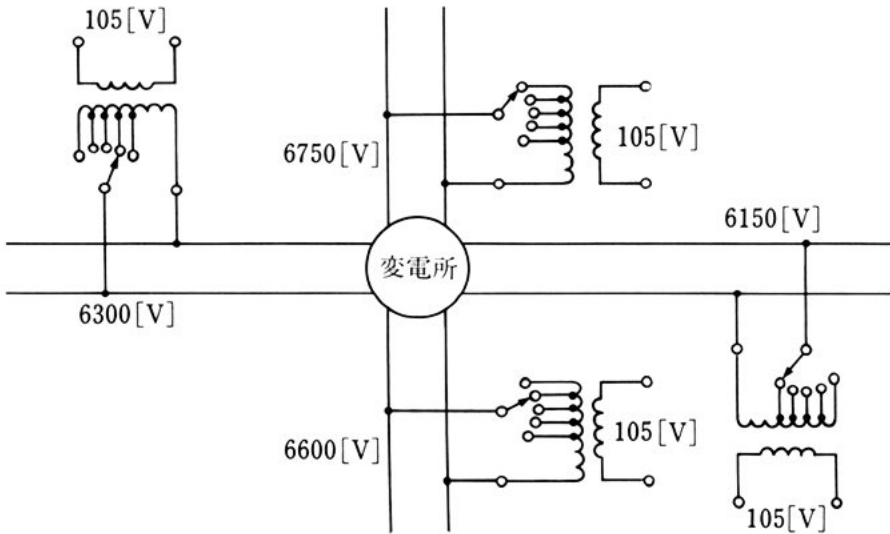



図 4 柱上変圧器のタップの選び方

プを選べばよい。なお，低圧配電線路の電圧の許容変動範囲は，電灯線で 101 [V] の上下 6 [V] 以内，動力線では 202 [V] の上下 20 [V] 以内と定められている*。

問 4. 図 3 において，昇圧器の巻数比 $a=\frac{3150}{210}$ である。$V_s=3000$ [V] のとき，昇圧後の電圧 V_{rh} はいくらか。

問 5. 6 [kV] 用柱上変圧器のタップ電圧について調べよ。

2. 電力損失と力率の改善

（1） 配電線路の電力損失と力率

配電線路では，電圧も低く距離も短いので，損失は抵抗損だけを考えればよい。図 5 において，力率 $\cos\theta$ の負荷に，一定の電力 P [W] を供給する場合，配電線路を流れる電流 I [A] は，次の式で表される。

* 電気事業法施行規則第 25 条による。

$$I=\frac{P}{V_r\cos\theta}\quad(7)$$

この場合，配電線路の抵抗損 p [W] は，次の式で表される。

図5 単相二線式

$$p=2I^2r=\frac{2P^2r}{V_r{}^2\cos^2\theta}\quad(8)$$

式（8）から，電圧 V_r [V]，電力 P [W] 一定のもとでは，抵抗損 p [W] は $\dfrac{1}{\cos^2\theta}$ に比例することがわかる。

例題 2. 力率 $\cos\theta_1$ が 0.8 のときの抵抗損は，力率 $\cos\theta_2$ が 1.0 のときの抵抗損の何倍になるか。

解答 $p_{0.8}=\dfrac{k}{\cos^2\theta_1}=\dfrac{k}{0.8^2}=\dfrac{k}{0.64}=1.56k$，$p_{1.0}=\dfrac{k}{\cos^2\theta_2}=\dfrac{k}{1.0^2}=k$

$\dfrac{p_{0.8}}{p_{1.0}}=\dfrac{1.56k}{k}=1.56$ すなわち，1.56 倍になる。

以上のことから，負荷の力率の大小が，配電線路の電力損失に非常に影響していることがわかる。図6(a)は，三相誘導電動機の回路

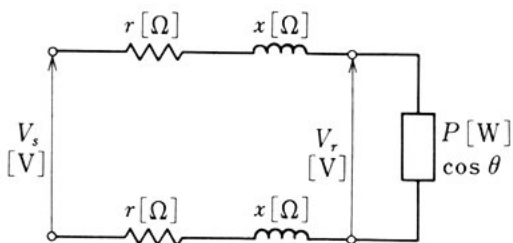
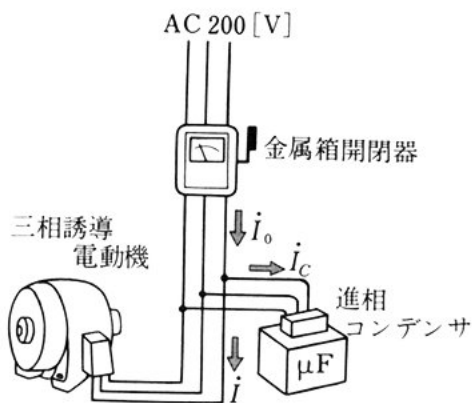
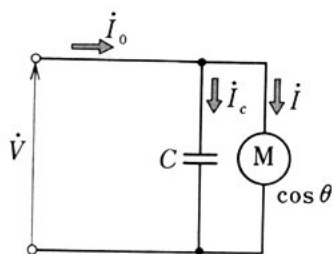
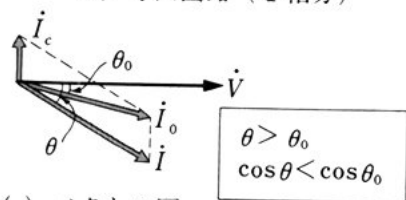



図6 力率の改善

(a) 電動機に進相コンデンサを接続した例
(b) 等価回路（1相分）
(c) ベクトル図

に，コンデンサを並列に接続して，総合負荷の力率を改善する例であり，図(b)は，1相分の等価回路である。図(c)のベクトル図からわかるように，コンデンサによる進み電流 $\dot{I}_c$ [A] が，負荷を流れる遅れ電流 $\dot{I}$ [A] の無効分の一部を打ち消し，その結果，総合負荷電流は $\dot{I}_0$ [A] となり，$\theta > \theta_0$ となる。したがって，力率は，$\cos\theta < \cos\theta_0$ となり，改善されたことがわかる。

力率が改善されれば，配電線路を流れる電流が減少するため，配電線路の電圧変動率は改善され，電力損失が減少するので，配電設備の利用率が向上する。そこで，電力会社では，力率のよい需要家に対しては，電気料金の割引を行っている。

なお，力率を改善するために，コンデンサを負荷に並列に接続するが，力率が改善されるのは，コンデンサ設置点より電源側である。

そこで，高圧側にコンデンサを取り付ければ，コンデンサの設置費は安くすむが，低圧側における電圧降下や電力損失の軽減には役だたない。それに対し，低圧側にコンデンサを取り付ければ，上で学んだ力率改善の利点は，すべて満たされる。

問 6．図5において，力率 $\cos\theta$ は 0.7 であり，電線路の抵抗損 p は 150 [W] であるという。受電端電圧 V_r [V]，出力 P [W] はもとのままで，力率 $\cos\theta_0$ を 0.8 にすると，電線路の電力損失はいくら減少するか。

(2) 進相コンデンサの容量

定格電圧 200 [V] の進相コンデンサの定格容量は，20°C におけるコンデンサの全静電容量をいい，μF で表す。また，高圧・特別高圧のものは定格電圧および定格周波数におけるコンデンサの無効電力 kVA で表す。

図 7(a)のように，静電容量 C [F] のコンデンサに，周波数 f

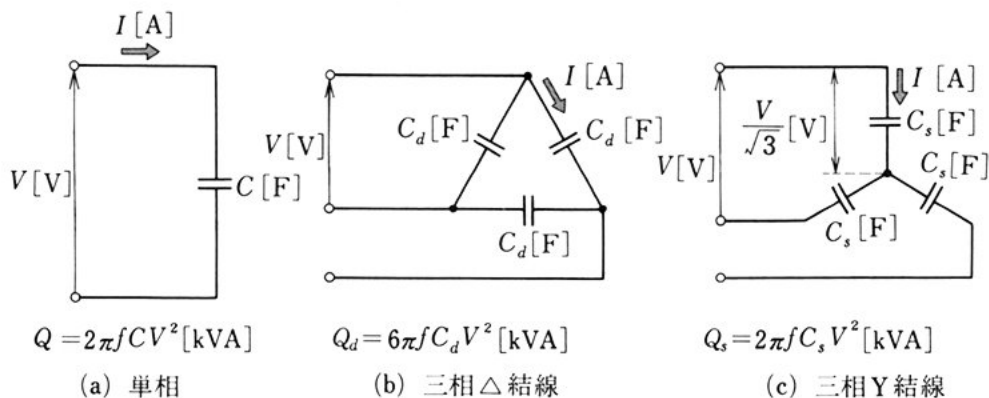



図 7　進相コンデンサの接続法と無効容量

[Hz], V [V] の電圧を加えるとき, I [A] の電流が流れるとすると, 回路の皮相電力 (無効電力) Q [VA] は, 次の式で表される。

$$Q=VI=2\pi fCV^2 \tag{9}$$

この式から, 電圧および周波数が一定であれば, Q は C に比例することがわかる。したがって, 商用周波数で, しかも定められた電圧のもとで用いる場合には, Q は, C と同様に取り扱うことができる。C のコンデンサの容量を, Q のようなかたちでよぶ場合, これを Q の単位をとって, **VA 容量**という。

なお, 無効電力の単位が kVA の場合には, **kVA 容量**という。

三相回路に用いる進相コンデンサ　図 7 (b) に示すように, 静電容量 C_d [F] のコンデンサが, △結線で接続されている場合, その全無効電力 Q_d [VA] は, 次の式で表される。

$$Q_d=3\times 2\pi fC_dV^2=6\pi fC_dV^2 \tag{10}$$

また, 図 7 (c) に示すように, 静電容量 C_s [F] のコンデンサが Y 結線で接続されている場合, その全無効電力 Q_s [VA] は, 次の式で表される。

$$Q_s=3\times 2\pi fC_s\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2=2\pi fC_sV^2 \tag{11}$$

表 1　進相コンデンサの定格容量

定格電圧	相　数	定格容量 [μF]
200 [V]	単　相	10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 900
	三　相	10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 900
	単相・三相両用	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750, 900

(JIS C 4901-1984 による)

式 (10), (11) からわかるように, Q_d と Q_s が等しくなるような, C_d, C_s の関係を調べてみると, 次の式で表される。

$$C_d=\frac{1}{3}C_s \qquad (12)$$

したがって, 同じ kVA 容量のコンデンサを作るのに, △結線にすれば, Y 結線の場合より静電容量が $\frac{1}{3}$ の容量ですむ。そのために, 三相回路では, コンデンサを △ 結線にして用いることが多い。

問 7. 静電容量が 75 [μF] の進相コンデンサを 3 個用いて, △結線および, Y 結線にしたときの kVA 容量 Q を求めよ。ただし, 回路の電圧 V は 200 [V] とし, 周波数 f は 50 [Hz] とする。

問 8. 配電線路で, 進相コンデンサの静電容量 C を小さくするためには, 進相コンデンサを高圧側に接続すればよいか, 低圧側に接続すればよいか。

問 9. 単相 200 [V], 50 [Hz] の電線路に静電容量が 100 [μF] の進相コンデンサを用いた。kVA 容量 Q はいくらか。

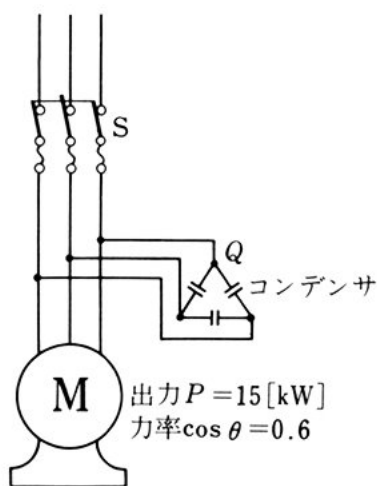
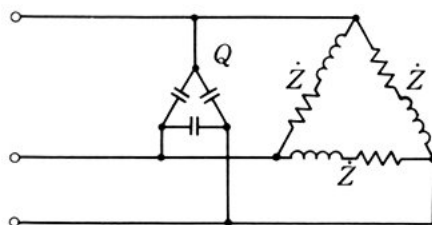
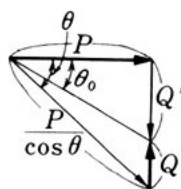
3. 進相コンデンサの所要容量の計算

(1) 負荷の電力が一定の場合

図8(a)の三相誘導電動機の力率は $\cos\theta$ で，出力は P [kW] である。この電動機に並列に進相コンデンサを接続して，合成力率を $\cos\theta_0$ にしたい。kVA容量がいくらのものを選べばよいかを調べる。

図8(a)の等価回路は，図(b)で表すことができる。ここで，進相コンデンサ Q [kVA] を並列に接続したための Q による進み無効電力と，誘導電動機の遅れ無効電力が打ち消し合って，図(c)に示すように，合成無効電力は，Q' [kvar] となり，小さくなる。このことから，合成力率は $\cos\theta_0=\dfrac{P}{\sqrt{P^2+Q'^2}}$ で表され，$\cos\theta<\cos\theta_0$ となり，力率は改善されたことがわかる。この場合の Q は，次の式で表される。

$$Q=P\tan\theta-P\tan\theta_0=P(\tan\theta-\tan\theta_0) \qquad (13)$$

図8　力率改善に要するコンデンサの容量

(a) コンデンサの結線図

(b) 等価回路

(c) P, Q, Q' の関係

例題 **3**．　図 8 (a) に示すように，出力 P が 15 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 60 [%] の三相負荷にコンデンサを接続して，力率 $\cos\theta_0$ を 80 [%] に改善したい。進相コンデンサの kVA 容量 Q はいくらにすれば よいか。

5　**解答**　式 (13) より，

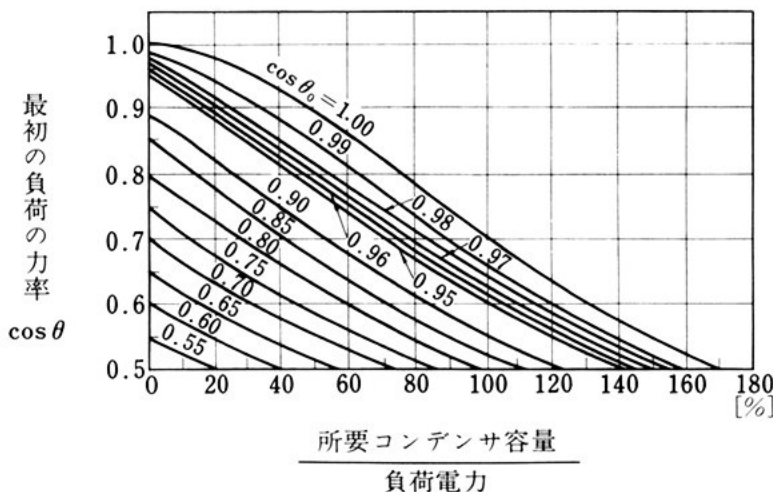
$$Q = 15 \times \left(\frac{\sqrt{1-0.6^2}}{0.6} - \frac{\sqrt{1-0.8^2}}{0.8} \right)$$

$$= 15 \times \left(\frac{4}{3} - \frac{3}{4} \right) = 8.75 \text{ [kVA]}$$

また，Q [kVA] の負荷電力 P [kW] に対する割合は，次の式で表される。

10
$$\frac{Q}{P} = \tan\theta - \tan\theta_0 = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0} - 1} \quad (14)$$

図 9 は，力率を $\cos\theta_0$ に改善するのに必要な $\dfrac{Q}{P}$ と，最初の負荷の力率 $\cos\theta$ の関係を示したものである。この図から明らかなように，改善後の力率 $\cos\theta_0$ が 1 に近づくに従って，所要のコンデンサ容量

図 9　力率改善に必要な Q

の増加率が大きくなり，経費も高くなる。

したがって，力率をどの程度まで改善するかは，コンデンサの経費と，力率改善で得られる利益とを比べて定めなければならない。ふつうは，改善後の力率 $\cos\theta_0$ は 0.85〜0.95 くらいにしている。

問 10． 力率 $\cos\theta$ が 60［%］の負荷がある。進相コンデンサを接続して負荷の力率 $\cos\theta_0$ を 80［%］まで改善したい。必要な $\dfrac{\text{所要コンデンサ容量}}{\text{負荷電力}}$ は何%か。図9から求めよ。

問 11． 図9から，改善後の力率 $\cos\theta_0$ が1に近づくほど，Q が大きくなることを確かめよ。

問 12． 電圧 V が 200［V］，周波数 f が 50［Hz］，出力 P が 50［kW］の三相負荷があり，その力率 $\cos\theta$ は 0.7 であるという。この負荷の力率 $\cos\theta_0$ を 0.8 にするには，いくらの kVA 容量の進相コンデンサが必要か。また，静電容量 C はいくらになるか。

（2） 供給皮相電力が一定の場合

図8(c)からわかるように，力率を改善すると皮相電力が減少し，供給設備に余裕ができる。したがって，負荷の増設が可能になる。

図10(a)に示すように，スイッチ①，②を閉じ，既設負荷と同じ力率の負荷 S'［kVA］と，進相コンデンサ Q［kVA］とを並列に接続し，合成皮相電力 S_1 が S に等しくなるようにする。このときの進相コンデンサの所要容量 Q［kVA］は，図(b)のベクトル図から，次の式で表される。

$$
\begin{aligned}
Q &= (S+S')\sin\theta - S\sin\theta_0 \\
&= S\cos\theta_0\tan\theta - S\sin\theta_0 \\
&= S(\cos\theta_0\tan\theta - \sin\theta_0) \qquad (15)
\end{aligned}
$$

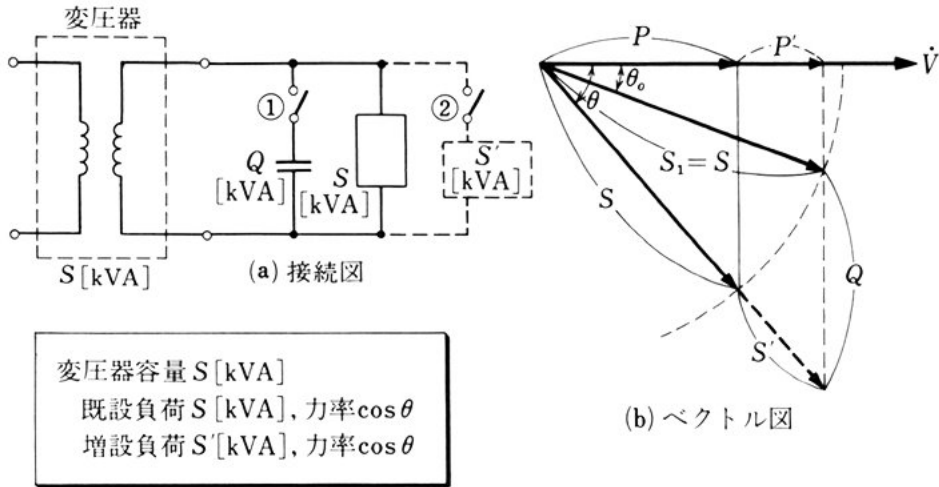



図 10　力率改善による増設容量

また，増加できる負荷の皮相電力 S' は，図(b)のベクトル図から，次の式で表される。

$$S' = (S + S') - S = \frac{S\cos\theta_0}{\cos\theta} - S = S\left(\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} - 1\right) \quad (16)$$

問 13．図 10 において，力率を改善すると，なぜ新しい負荷が増設できるのか。

問 14．増加できる負荷 P' [kW] を S' を用いて表せ。

問 15．定格容量 100 [kVA] の変圧器に，出力 P が 70 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 0.7 の負荷が接続されている。この負荷に並列に進相コンデンサを接続して，合成力率 $\cos\theta_0$ を 0.9 に改善し，この変圧器の定格容量まで負荷を増設したい。増設できる負荷（力率 0.7）の皮相電力 S' はいくらか。また，電力 P' はいくらか。

問 16．一般に，力率の改善は，0.85〜0.95 にとどめるのはなぜか。

問　　題

1. 図11の高圧配電線路において，$R=0.6$ [Ω/km]，$X=0.5$ [Ω/km] であり，受電端電圧 V_r が 6000 [V] で，力率 $\cos\theta$ が 0.8，出力 P が 420 [kW] の三相負荷があるとき，送電端の電圧 V_s [V] はいくらか。また，この場合の電圧降下率は何パーセントになるか。ただし，電線路の長さは 5 [km] である。

図 11　　　図 12

2. 図12に示す長さ 240 [m] の単相二線式低圧配電線路がある。点Dを供給点とし，A, C両端における電圧を等しくしようとするときの，点Dの位置を求めよ。ただし，電線は硬銅線で，その太さは，A, B間 4 [mm]，B, C間 5 [mm]，負荷力率は 100 [%] として，電線のリアクタンスは無視する。

3. 図13に示す長さ 150 [m] の単相二線式の低圧配電線路があり，点Aから 100 [V] を供給する。いま，点CのスイッチSを開いたとき，点Cの電圧は 98.5 [V] であった。Sを閉じたときの点Cの電圧は何ボルトか。

図 13

ただし，A, B間，B, C間の電線の太さは同じで，負荷の力率はどちらも 100 [%] とし，電線のリアクタンスは無視するものとする。

4. 図14に示す単相二線式の配電線路において，B, C間，A, B間，F,

A 間の電圧降下を求めよ。ただし，r，x は，それぞれ 1 線の抵抗，リアクタンスとする。

$r_2=0.1$ [Ω]
$x_2=0.05$ [Ω]
$r_3=0.2$ [Ω]
$x_3=0.1$ [Ω]
F　$r_1=0.3$ [Ω]
$x_1=0.15$ [Ω]　A　B　C
15 [A]　8 [A]　10 [A]
力率 0.6　0.8　0.8

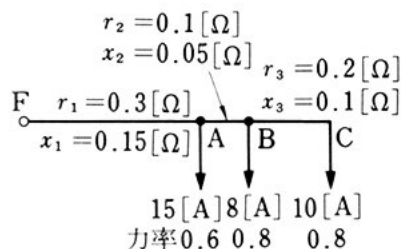



図 14

5．三相出力 P が 500 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 0.6 の変電所に，300 [kVA] の進相コンデンサ Q を設置したとき，力率 $\cos\theta_0$ はいくらに改善されるか。

6．ある工場の需要設備は，電圧 V が 200 [V]，周波数 f が 60 [Hz]，三相出力 P が 20 [kW]，力率 $\cos\theta$ が 70 [%] である。力率 $\cos\theta_0$ を 90 [%] に改善するのに必要な進相コンデンサの kVA 容量 Q を求めよ。また，進相コンデンサが△結線されている場合の静電容量 C を求めよ。

7．図 15 に示すように，既設の負荷が P_1 である需要家において，新たに P_2 の負荷を増設することになった。そして，この際，進相コンデンサによって合成力率 $\cos\theta_0$ を 90 [%] に改善したいという。進相コンデンサの所要容量 Q はいくらか。

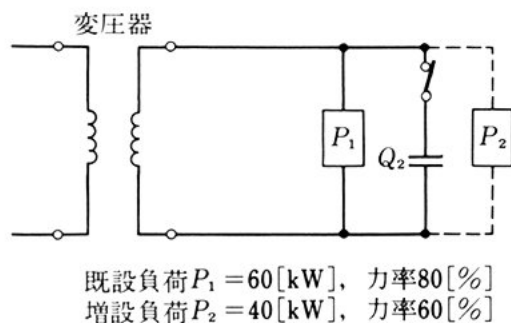
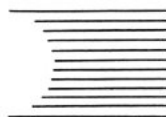
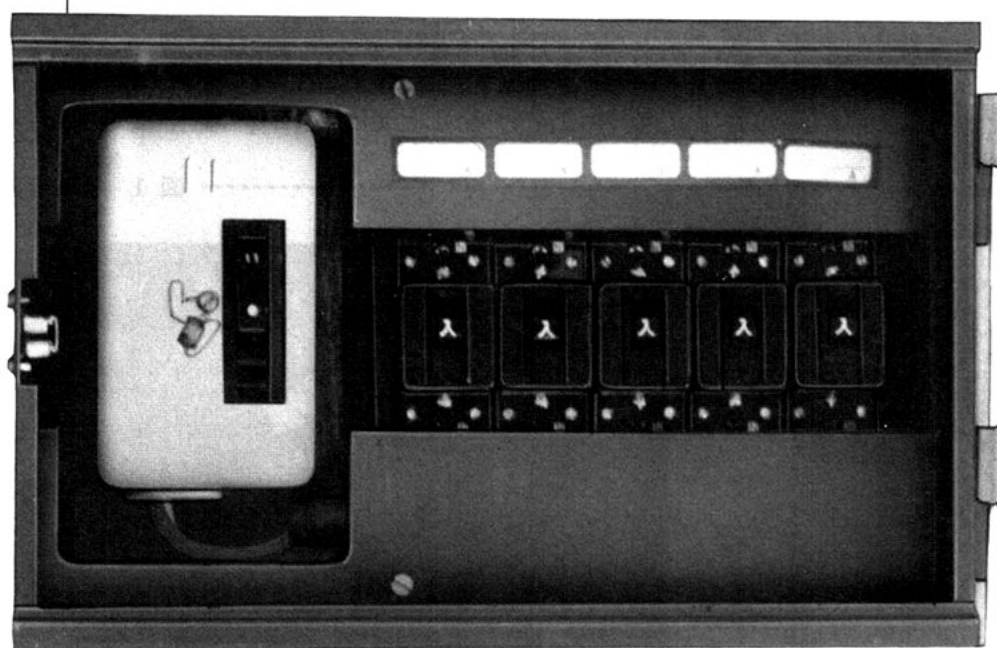



図 15

第11章

屋内配線

需要家の建物内に施設される電線路を屋内配線という。屋内配線には，工場やビルディングのように特別高圧や高圧とよばれる高い電圧で受電する場合と，住宅などで低圧で直接受電する場合とがある。

この章では，自家用変電設備の構成や保安業務について学ぶとともに，低圧屋内配線に用いられる材料・設計・工事方法・保安などについて学ぶ。

分電盤

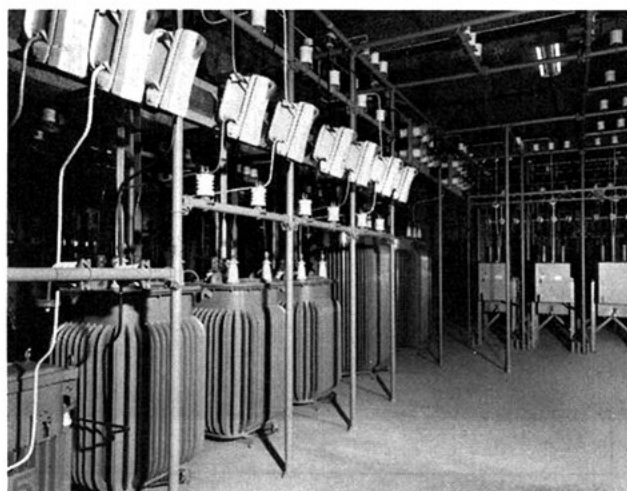
1　自家用電気設備

この節の目標　電力会社との契約最大電力が50［kW］以上の需要家，例えば，病院・学校・工場などでは，高圧で受電することになっている。この場合，その需要家だけの設備に適した使用電圧に変えるため，建物所有者が専用の変電設備をもつことが必要になる。これを自家用受変電設備という。ここでは，自家用電気施設や設備の概要・計画・保守などについて調べる。

1.　自家用電気施設と設備

（1）　変電室の位置の選定

ビルディングの主変電室は，動力負荷の最も多い地階に設けられるのがふつうであるが，超高層ビルディングでは，中間階や屋上に第二，第三の変電室を設けることが，配電上有利である。また，工場などでは，屋外に設けることが多いが，塩害などのある場所では，

図 1　自家用変電設備の例

屋内に設置する。このように，立地条件や設備の規模などによって設置する位置が決まってくる。一般に，変電室の位置の選定には，次の事項を参考にする。

1) 負荷の中心に近いこと。
2) 電源の引き込み，構内配線の引き出しに便利なこと。
3) 爆発物や可燃性の貯蔵所の付近を避けること。
4) 機器の搬入・搬出に便利なこと。
5) 将来の拡張・増設の余地のあること。

問 1. 変電室が負荷の中心に近いと，どんな点で有利か。

(2) 変電室の面積

変電室の面積は，次のような事項を考慮して決める。

1) 受電電圧の高さ
2) 変圧器容量およびコンデンサ容量と台数
3) 高圧盤および低圧盤の数量
4) 機器の形式
5) 保守・監視のための部屋の広さ

以上のうち，高圧の変電室で最も大きな要素は，変圧器容量である。一般に変電室の広さは，次の式で求められる。

$$\text{変電室の最小面積} = 3.3 \times \sqrt{\text{変圧器容量}\,[\text{kVA}]} \quad [\text{m}^2]$$

例えば，最大使用電力が 100 [kVA] の変電室の広さは，$3.3 \times \sqrt{100} = 3.3 \times 10 = 33$ [m²] となる。

問 2. 最大使用電力 900 [kVA] の変電室を計画中である。変電室の最小面積はいくらか。

(3) 高圧受電設備

図 2 は，小規模な自家用開放形高圧受電設備の接続図の例であり，次に示す機器類が設備されている。

図 2　開放形高圧受電設備の接続図

ケーブルヘッド（cable head : **CH**）　鉛被ケーブルの終端を外部の電線と接続する部分に，接続防護用として使用するものである。

計器用変圧変流器（potential current transformer : **PCT**）　受電設備において，取引電力量を高圧回路で計量するために用いられる装置である。

断路器（disconnecting switch : **DS**）　機器の点検，修理の際，その部分を電源から開放し，あるいは回路の接続を変更する場合などに用いる。負荷電流が流れている回路の遮断には用いない。

避雷器（lightning arrester : **LA**）　受電設備の引込口などに設置され，雷および開閉などによる異常電圧が回路に侵入したとき，大地に放電させるものであり，第1種接地工事が施されている。

遮断器（circuit breaker : **CB**）　高圧回路の開閉のほか，保護継電器などと組み合わせて，回路の過電流や短絡・地絡などの事故を検出し，自動的に回路を遮断して，これを保護するものである。なお，遮断器には，120〜121ページで学んだように，**気中遮断器**（air circuit breaker : **ACB**），**油遮断器**（oil circuit breaker : **OCB**），**がいし形遮断器**（porcelain-clad circuit breaker : **PCB**），**真空遮断器**（vacuum circuit breaker : **VCB**）などが用いられる。

計器用変圧器（potential transformer : **PT**）　高圧回路の電圧を，直接，計器に導くことは危険が多く，計器の構造上からも不可能である。それで，これを用いて低圧に変成し，電圧計・電力計および保護継電器などと一対にして用いられる。

変流器（current transformer : **CT**）　これは電流の変成器であり，高圧回路や低圧回路の大電流を，これに比例する小電流に変成して，計器や保護継電器などと一対にして用いられる。

進相コンデンサ　一般の負荷設備には，誘導性のものが多いため，位相が遅れ，無効電力が大きく，力率がわるい。したがって，コンデンサを用いて力率を改善している。

過電流継電器（overcurrent relay : **OCR**）　遮断器の電流引外しコイルと変流器とに接続されており，高圧回路に異常電流が流れた場合に，それを検出して，遮断器を動作させ，回路を遮断して，各機器の保護をする。

電流計切換スイッチ（ammeter change-over switch : **AS**）　三相回路で各相の電流を1個の電流計で測るための切換装置である。

電圧計切換スイッチ (voltmeter change-over switch : **VS**)　三相回路の電圧を1個の電圧計で測るために用いる装置である。

配電盤　電気機械・器具や電気回路の運転状況を，監視・制御するためのもので，図2の接続図の場合，電力量計，電力計，力率計，電圧計，電流計，継電器，スイッチ類などは盤の前面に取り付けてあり，断路器，計器用変圧器，変流器などは内部に配置されている。

その他の機器・計器類　以上のほかに，変圧器 (transformer : **T**)・開閉器 (switch : **S**)・高圧カットアウト (primary cut-out : **PC**)・配線用遮断器 (molded case circuit breaker : **MCCB**)・地絡継電器 (ground relay : **G**) などがある。

問 3.　遮断器と断路器の相違点を挙げよ。

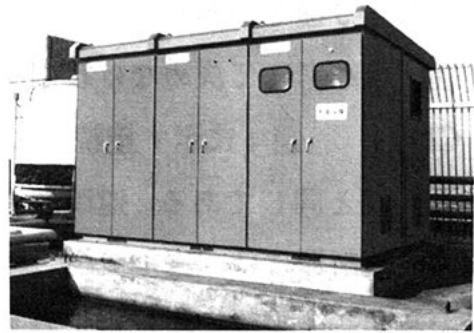
2. キュービクル式高圧受電設備

(1) キュービクル式高圧受電設備の概要

高圧で受電する契約電力500 [kVA] 以下の小規模な建物や工場では，電気主任技術者は，いくつかの工場の電気主任を兼任していることが多く，専任の保守員がいないために，じゅうぶんに機器を保守・管理することは望めない。したがって，このようなところの設備には，信頼度が高く，操作が安全・容易なことが必要である。このような目的のために作られたものが，**キュービクル式高圧受電設備**であり，受電用機器や配電用機器をできるだけ簡略化して，**キュービクル**とよばれる金属製の箱に収めてある。

キュービクル式は，開放形に比べて次のような特徴がある。

図 3 屋外キュービクルの外観

1) 総合建設費が安い。
2) 所要床面積が少なくてすむ。
3) 専用の部屋が不要である。
4) 保守，点検が容易である。
5) 安全である。
6) 負荷増設に際して増設が簡単である。

なお，これには，屋内用と屋外用とがある。都市部では，地価の高騰などから，図 3 のように建物の屋上に設置する例もある。

問 4. 6.6 [kV] の受電盤の鉄箱に施す接地工事は第何種か。

(2) 接 地 方 式

キュービクル式高圧受電設備には，受電用の主遮断器の種類によ

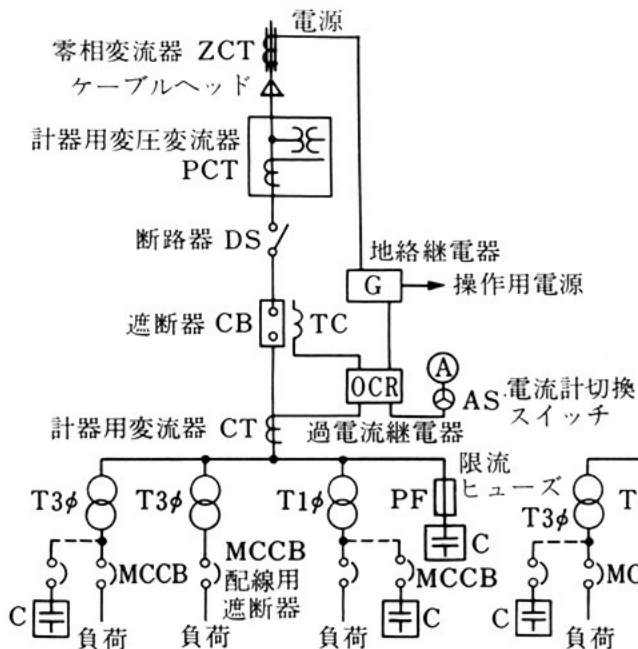



図 4 CB形の接続図

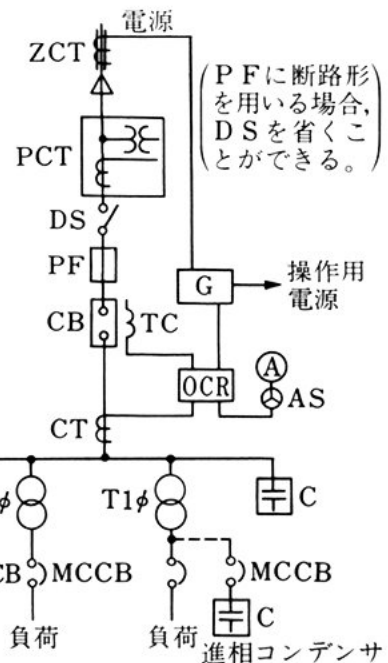



図 5 PF・CB 形の接続図

って次の3種類があり，どれを用いるかは，使用場所に適した性能や経済性を考えて決めなければならない。

CB形　図4に示す接続方式を**CB形**といい，開放形高圧受電設備の接続と同じである。遮断装置には，主に油遮断器を用いる。また，油遮断器には，過電流継電器と高圧地絡継電器とを組み合わせて，電源への事故の波及防止および機器・配線の保護を図っている。

PF・CB形　図5に示す接続方式を**PF・CB形**といい，CB形とほぼ同じで，遮断器と電力ヒューズ（power fuse：**PF**）を組み合わせたものである。キュービクル内の短絡事故は電力ヒューズで遮断し，負荷電流の断続，過電流ならびに地絡保護は，遮断器で行う。

この方式は，電力ヒューズに遮断能力をもたせたものであるから，遮断器の遮断容量は，電力ヒューズよりも小さいものが使用されている。したがって，高圧側の短絡事故に際しては，遮断器の動作前に電力ヒューズが溶断し，電路を遮断するように構成されている。

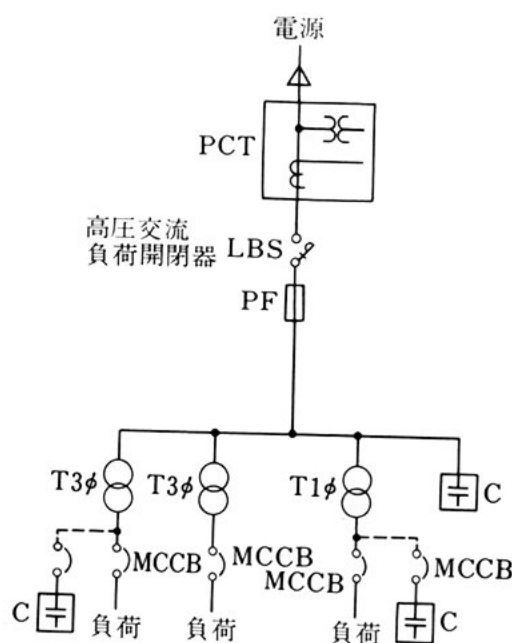
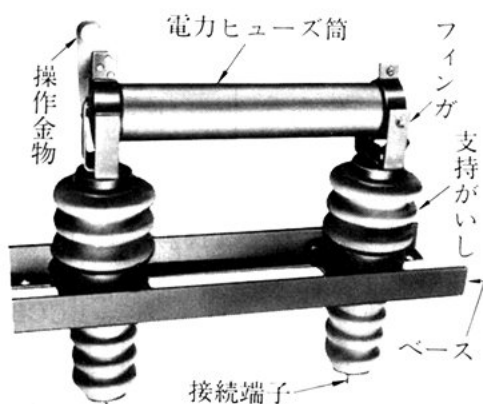



図6　PF・S形の接続図　　**図7　断路形高圧電力ヒューズ**

したがって，短絡容量の大きな地点に設置される。

PF・S形　図6に示す接続方式を**PF・S形**といい，キュービクル式高圧受電設備として多く用いられる。この方式は，遮断器を省略して，代わりに，図7に示す断路形高圧電力ヒューズに高圧交流負荷開閉器を組み合わせたものである。この回路では，短絡事故は電力ヒューズで遮断し，負荷電流の断続は高圧交流負荷開閉器で行う。

PF・S形における高圧側は，電力ヒューズ，高圧交流負荷開閉器，変圧器，高圧進相コンデンサしかなく，高圧機器を極力簡略化して，保安上必要な最小限にとどめ，設備費の低減を図ったものである。

なお，いずれの方式においても，変圧器専用の高圧カットアウトは省略できるが，保守の点からは，取り付ける方が便利である。

問 5.　変圧器に高圧カットアウトがないと，どんな場合に不便か。具体的な例を挙げて説明せよ。

（3）　設置場所および所要面積

設置場所　キュービクル式高圧受電設備は，屋上・デッキ上など屋内・屋外のあらゆる場所に設置することができるが，次の諸条件も考える必要がある。

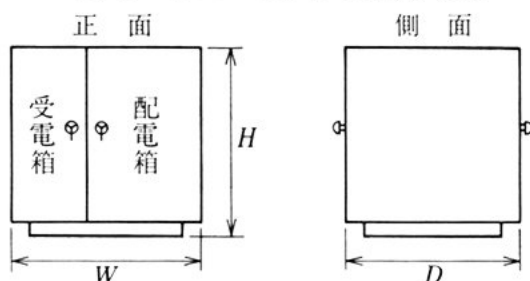
1)　なるべく負荷の中心であること。

2)　電線の引き込みおよび引き出しが容易に行えること。

3)　保守・修理および管理に便利なこと。

4)　将来の増設が可能であること。

所要面積　表1は，キュービクルの形状および外形寸法の概略である。図のキュービクルには，保守・点検用として正面および背面にドアがある。したがって，据え付け・修理作業などを考えて，

表 1　キュービクルの外形寸法

変圧器の総容量	屋内外の別	W [mm]	D [mm]	H [mm]
150 [kVA] 以下	内	2500 以下	2000 以下	2400 以下
	外	2500 以下	2000 以下	2600 以下
150 [kVA] を超え 300 [kVA] 以下	内	3600 以下	2200 以下	2400 以下
	外	3600 以下	2200 以下	2800 以下
300 [kVA] を超え 500 [kVA] 以下	内	6000 以下	2400 以下	2400 以下
	外	6000 以下	2400 以下	2800 以下
500 [kVA] を超え 1000 [kVA] 以下	内	8400 以下	2600 以下	2400 以下
	外	8400 以下	2600 以下	2800 以下

(JIS C 4620-1986 による)

少なくとも正面は 1.5 [m], その他の面は 1 [m] 以上の空間を確保する必要がある。

問 6. 表 1 において, W が 800 [mm], D が 800 [mm] のキュービクルを設けるのに必要な床面積はいくらか。スペース分も考えよ。

問 7. キュービクル式高圧受電設備は, 開放形高圧受電設備と比べて, どのような点が異なっているか。　5

問 8. キュービクル式高圧受電設備は, 増設が容易に行えるという。その理由を考えよ。

3. 保安の実務

(1) 保安規程

自家用電気工作物の設置者は，保安業務（維持・管理の作業）を的確に行うため，図8に示される保安規程を作成し，通商産業省に届け出ることになっている。この保安規程の目的と内容を次に示す。

目的　自家用電気工作物は，工場・事業場または企業の業種により，その設備の規模・内容など多種多様である。このような自家用電気工作物の巡視・点検・試験などの方法を，法令で一律に規制することは，必ずしも適当ではない。そこで，このような事項については，設置者にそれぞれの企業形態にあう方法を自主的に定めさせ，自主保安体制を確立させることが目的である。

内容　保安規程に定めるべき事項については，電気事業法施行規則第76条に示されており，次のような内容である。

1) 業務を管理する者の職務および組織に関すること。

2) 業務に従事する者に対する保安教育に関すること。

図8 保安規程の内容の例

ふりがな 設置者名		
設置場所		
受電電力		最大電力　kW
	内訳	常時電力　kW　その他　kW 期間常時電力　kW 臨時電力　kW
受電電圧		V

3)　巡視・点検および検査に関すること。

4)　運転・操作に関すること。

5)　災害の場合にとる措置。

6)　保安についての記録に関すること。

7)　そのほか，電気工作物の維持・運用などに関すること。

したがって，自家用電気工作物の設置が，それぞれの事業場の実態に適するように，各内容を具体化する必要がある。

問 9.　自家用電気工作物の設置者は，保安規程を作成し，通商産業省に届け出ることが義務づけられている。その目的は何か。

(2)　保　安　業　務

電気設備を設置して長期間使用していると，温度・湿度・じんあいなどの影響や使用状態などにより，絶縁がわるくなって火災事故を起こしたり，危険であると同時に，工場の生産を低下させる原因にもなる。したがって，保安業務は，電気事故を未然に防止するために必要である。

点検・試験項目の決定　この保安業務は，巡視・点検の箇所や，測定試験を行う機器の種類および箇所を選定し，その機器のどの部分を点検し，どのような試験を実施するかを検討し，表2に示す点検・測定試験項目を決める。また，点検・測定試験などの周期(毎日1回，毎月1回など）を電気設備技術基準や保安規程に従って決める。なお，点検の種類には，日常点検・定期点検や精密点検などと区分した呼び方がある。

点検・測定結果の判定基準　電気設備の点検および測定などを実施したとき，その結果の良否を判定する必要がある。その判定の基準は，電気設備技術基準によって決める。例えば，電気設備技術

表 2　巡視・点検・測定などの基準例

対象		点検および試験項目	日常	定期	
			1週間	6か月	1　年
負荷設備	電動機など	外部一般	○		
		外部精密			○
		絶縁抵抗		○	
	電熱装置	外部一般	○		
		外部精密			○
		絶縁抵抗		○	
	配線・配線器具	外部一般	○		
		外部精密			○
		絶縁抵抗		○	
	小形機器 照明装置	外部一般	○		
		外部精密			○
		絶縁抵抗		○	

基準の第 14 条には，**低圧回路***の絶縁抵抗の値に関して，次の規定がある。

1)　**対地電圧****が 150 [V] 以下の場合，絶縁抵抗は 0.1 [MΩ] 以上

2)　対地電圧が 150 [V] を超え 300 [V] 以下の場合，絶縁抵抗は 0.2 [MΩ] 以上

3)　対地電圧が 300 [V] を超える場合，絶縁抵抗は 0.4 [MΩ] 以上

---

*　直流では 750 [V] 以下，交流では 600 [V] 以下の電圧を低圧という（226 ページ参照）。

**　接地式電路では，電線と大地との間の電圧をいい，非接地式電路では，電線相互間の電圧をいう。

したがって，対地電圧が200［V］の回路の絶縁抵抗が50［MΩ］あったとすれば，この回路には異常がないと判定する。なお，電気設備技術基準に具体的に示されていないものについては，製作会社の試験成績表，JIS（日本工業規格）・JEC（電気学会電気規格調査会標準規格）・JEM（日本電機工業会標準規格）などを基準にして判定する。

問 10．JIS・JEC・JEMとはどんな規格か，調べてみよ。

（3） 日常および定期点検

点検には，それを行う周期によって，日常点検と定期点検がある。

日常点検は，電気設備が運転されている状態で，施設の外観を点検するもので，毎日行われる。点検項目には，損傷・汚損・異音・異臭などの有無である。表3は，その項目の一例である。

定期点検は，6か月ないし1年にいちど行われるもので，周期が長

表 3　負荷設備の日常点検項目の例

対象		点検項目	結果			
			月 日	月 日	月 日	
電動機そのほかの回転機	本体 整流子 ブラシ	異音，振動，回転，過熱，損傷，異臭，制御装置，接地部など				
電熱装置	本体 接続部	損傷，変形，変色，過熱，ゆるみ，腐食など				
配線 配線器具	配線 開閉器 ヒューズ	汚損，損傷，変色，過熱，ゆるみ，接地部など				
小形機器 照明装置	小形機器 照明装置	異音，汚損，不点灯，損傷，過熱，照明効果など				

表 4　継電器の定期点検の記録の例

継電器試験											
月日	用途	種類	製造会社	形式	製造番号	整定値		最小動作電流	限時特性		結果
						タップ	レバー		200 [%]	500 [%]	

く，主として電気設備の運転を停止しなければできない部分の点検と測定試験を行う。点検項目としては，接地抵抗・絶縁抵抗，継電器の試験，遮断器の動作試験などのほか，高圧機器のがいし類の清掃，絶縁油の点検などがある。なお，表 4 は継電器の定期点検の場合の記録の例である。

問 11.　絶縁抵抗の値は，どのような器具で測定するか。

問 12.　日常点検と定期点検の相違点は何か。

問 13.　絶縁油は，どのような点について点検すればよいと思うか。

問　　題

1. 図9は，高圧受電設備の標準接続図の例である。この接続図について，次の問いに答えよ。

(1) 図の①，②，③および④を文字記号で示せ。

(2) 図のPT，CT，FおよびSは，何を表しているか。

(3) 単線接続図で表せ。

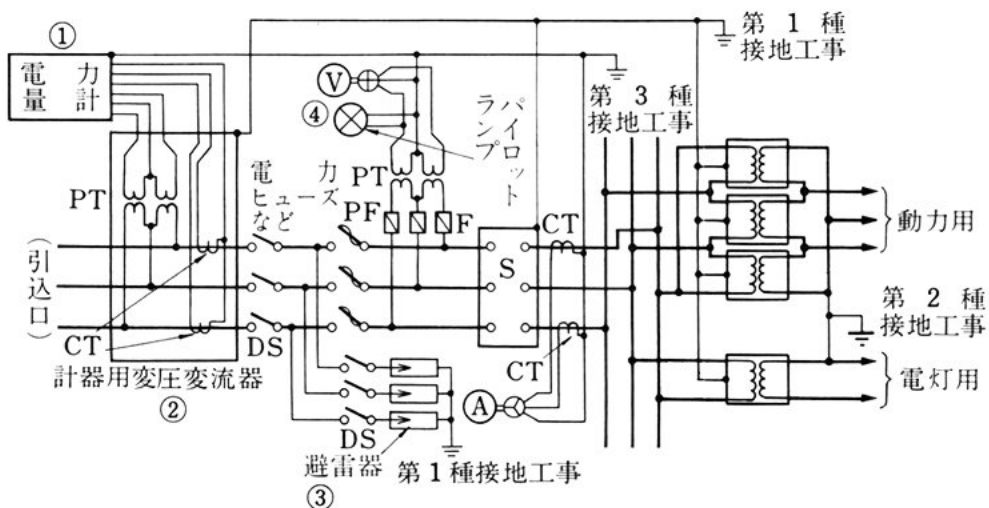



図 9

2. 変電所と変電室（変電所に準ずる場所）は，どのような点が異なるか。

3. 変電室の最小面積は，変圧器容量[kVA]と，どんな関係があるか。

4. 屋外用と屋内用のキュービクルは，構造上どこが違っているか，調べてみよ。

5. 電気設備は，保安規程に基づいて，保安業務が必要であるといわれている。なぜか。

2 屋内配線

この節の目標　住宅・事務所・工場などにおいて，電気を使用する場合，配電線路から電線を引き入れて，屋内に電線路を施設する。これを屋内配線という。したがって，屋内配線は，直接人に触れる機会が多いので，とくに感電や漏電火災の危険がないように施設する必要がある。

ここでは，屋内配線の電気方式，設計の概要，施工方法などについて調べ，災害防止のための規制などについて学ぶ。

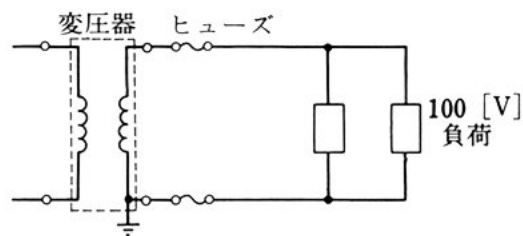
1. 回路方式

(1) 回路方式の種類と用途

単相二線式 100 [V]　図1は，100 [V] 単相二線式の回路図である。一般住宅・事務所・工場などの電灯や小形電気機器類に，広く用いられている。

この方式は，負荷が大きくなると電圧降下が大きくなる。これを小さくするためには，電線を太くする必要があり，不経済となるので，一般に，電流が 30 [A] 以下の場合に用いられる。

図1　単相二線式

単相二線式 200 [V]　溶接機やX線装置などのように，単相で容量の大きい機器の場合，100 [V] の電圧では，電流容量が大きくなるので，この方式が用いられる。

単相三線式100/200［V］　この方式は，図2(a)のように，変圧器の低圧側の二つの巻線を直列に接続し，そこからもう1本の線を引き出したものである。引き出した線を**中性線**という。このようにすると，外線の両線(a，b)と中性線との間が100［V］，外線の両線間では200［V］になり，2種類の電圧が取り出せる。

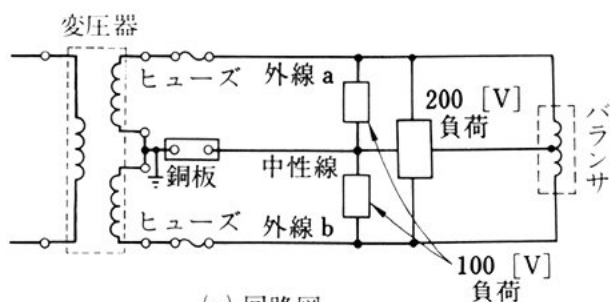
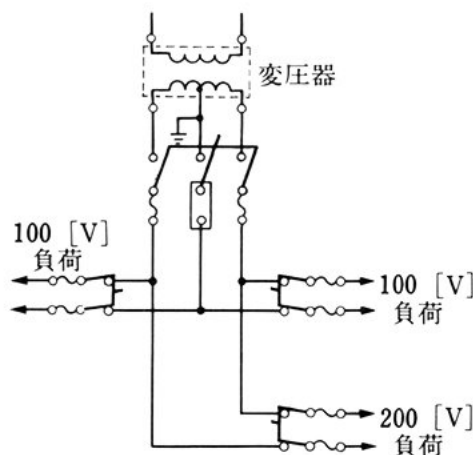



図 2　単 相 三 線 式

また，単相二線式に比べて，電力損失や電圧降下が小さく，電線の使用量が節約できる。しかし，中性線と各外線の間に接続する負荷（100［V］）は，ほぼ同じ容量の負荷を接続することが必要である。もし，両回線の負荷の容量が大きく異なると，電線路の電圧降下が異なり，負荷の端子電圧が不平衡になる。

これを防ぐ目的で図2(a)に示すバランサが用いられている。**バランサ**は，単巻変圧器と同じ構造のもので，各巻線の誘導起電力によって中性線の電流を0にするような電流を流し，外線a，bの電流を等しくさせ，つねに端子電圧が平衡するようになっている。

また，電気設備技術基準第40条では，図2(b)のように，中性線にヒューズを入れてはならないと規定している。その理由は，負荷が

平衡していないとき，短絡などによって中性線のヒューズが切れると，100 [V] 負荷の電圧がいちじるしく不平衡になり，多くの負荷が接続されている側では，電圧が低下し，負荷の少ない側では，電圧が高くなり，これに接続されている電灯や機器に障害を与えるからである。

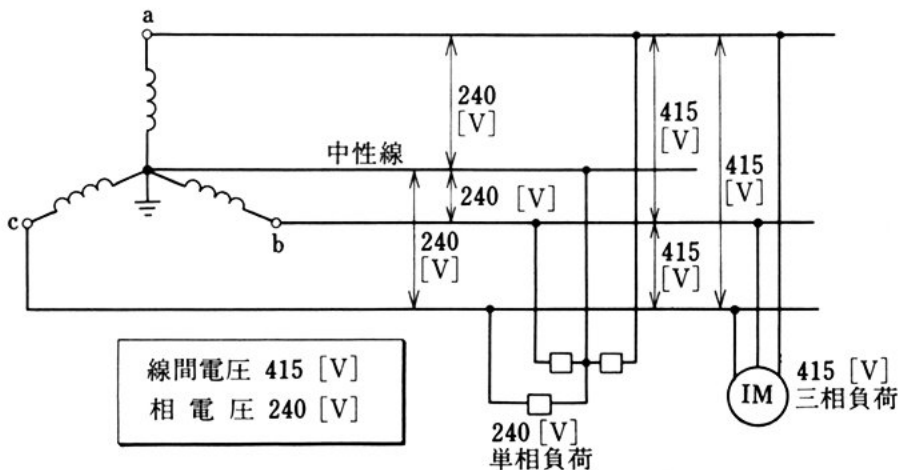
三相三線式 200 [V]　主として，三相誘導電動機に用いられる回路であり，工場などの動力負荷は，この方式である。

三相四線式 240/415 [V]　最近は，大きな建物や工場では，400 [V] 程度の三相四線式が用いられている。この方式は，図 3 のように，240 [V] を照明に，415 [V] を動力に用いており，建設費の節約，保守上の利点などから，さかんに採用されるようになってきた。

問 1. 単相三線式において，中性線にヒューズを入れてはならないと規定されている。なぜか。

問 2. 単相三線式と単相二線式を比較し，その利点と欠点を述べよ。

問 3. 最近では，照明に 240 [V] が用いられているが，同一容量の負荷に 100 [V] で電力を供給する場合と比べ，どんな点が有利か。

図 3　三相四線式の例

(2) 低圧引込線と分岐回路

配電線路の支持物から分岐して，直接に需要場所の引込口に至る部分の電線が**引込線**である。引込線には，電圧の区分によって，高圧引込線と低圧引込線とがあり，施設方法によって，架空引込線と地中引込線に分けられる。また，工事方法によって，単独引込線（単に引込線という）と連接引込線とがある。

低圧架空引込線は，次の規定* に準じて施設する。

(a) 引込線の施設高さの規定

1) 道路を横断する場合は路面上 5 [m] 以上（ただし，技術上やむを得ない場合で，交通に支障のないときは 3 [m] 以上）。
2) 鉄道・軌道を横断する場合は軌条面上 5.5 [m] 以上。
3) 横断歩道橋の上に施設する場合は路面上 3 [m] 以上。
4) その他の場合は地表上 4 [m] 以上（ただし，技術上やむを得ない場合で，交通に支障のないときは 2.5 [m] 以上）。

(b) 引込線の種類と太さの規定

電線には，絶縁電線またはケーブルを使用する。また，ケーブルの場合を除き，直径 2.6 [mm] の硬銅線またはこれと同等以上の強さおよび太さのものを使用する。ただし，径間が 15 [m] 以下の場合は直径 2 [mm] のものでよい。

連接引込線は，需要場所の引込線から分岐して，他の需要場所の引込口に至る電線である。これは，人家が密集している地域で，引込線の混雑を防ぐために用いられる。連接引込線は，低圧引込線の規定のほか，次の規定がある**。

---

* 電気設備技術基準第 107 条。

** 電気設備技術基準第 108 条。

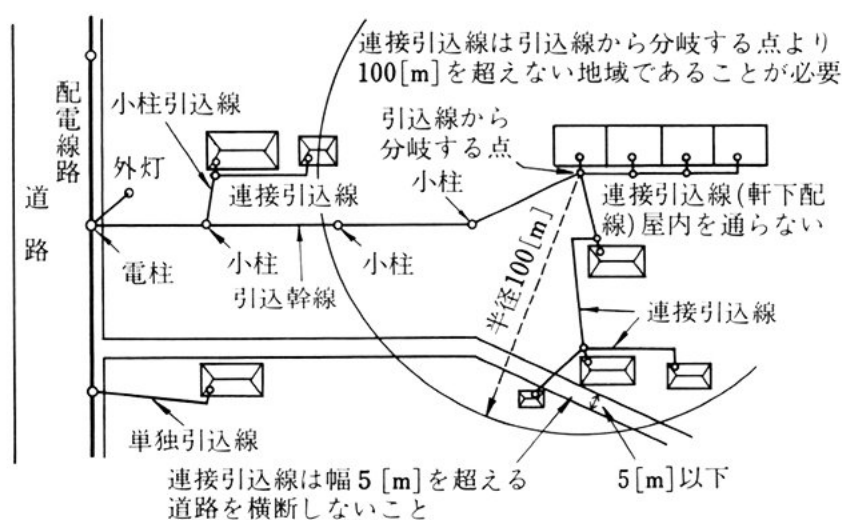



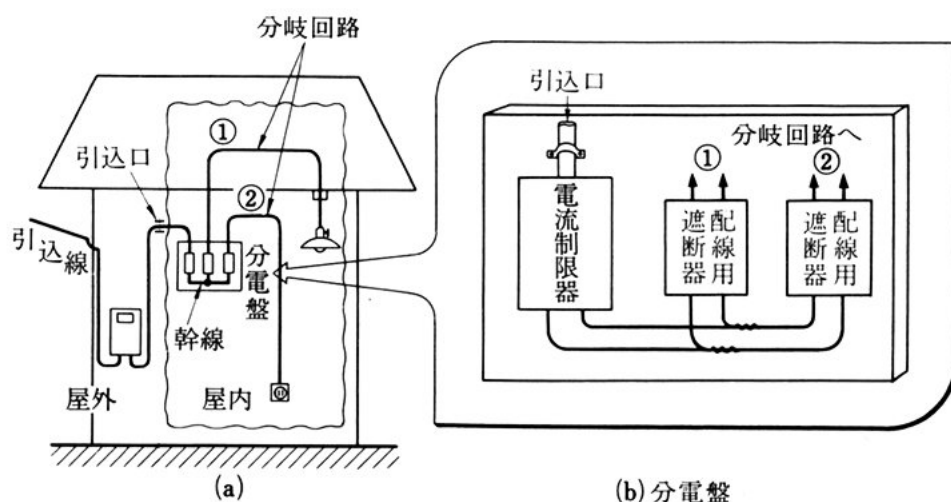
図 4　連接引込線

1)　引込線から分岐する点から100 [m] を超える地域にわたらないこと。

2)　幅 5 [m] を超える道路を横断しないこと。

3)　屋内を通過しないこと。

幹　線　屋内配線は，保安上および使いやすさの点から，開閉器を取り付け，負荷の種類や容量などによっていくつかの回路に分

図 5　引込線・幹線と分岐回路

ける。この場合，図5(a)に示すように，引込口から開閉器または配線用遮断器までの配線を**幹線**という。また，図5(b)に示すように，電流制限器と開閉器または配線用遮断器を集めたものを**分電盤**という。

分岐回路　1需要家の全部の負荷を一つの回路として電力を供給すると，1台の負荷の故障が他に影響したり，全面的に停電になったりする。また，回路の電流容量も大きくなり，保安のためのヒューズも大きくなるため，コードなどが短絡した場合でも，ヒューズが切れず，コードが焼け，出火などの危険がある。このようなことから，実際には，回路をいくつかに分けており，これを**分岐回路**という。

なお，分岐回路には，表1に示すような種類があり，それぞれの過電流遮断器の定格電流，接続してよい電灯の受口，コンセントの定格などが決められている。

表1　分岐回路の種類

分岐回路の種類	過電流遮断器の定格電流	接続してよい電灯受口	接続してよいコンセントの定格電流
15［A］分岐回路	15［A］	制限なし	15［A］以下
20［A］分岐回路	20［A］(配線用遮断器)	制限なし	15［A］以下
20［A］分岐回路	20［A］(ヒューズに限る)	大形のみ	20［A］
30［A］分岐回路	30［A］	大形のみ	20［A］以上 30［A］以下
40［A］分岐回路	40［A］	大形のみ	30［A］以上 40［A］以下
50［A］分岐回路	50［A］	大形のみ	40［A］以上 50［A］以下

（「内線規程」による）

表1で，20［A］分岐回路が二つあるが，配線用遮断器の動作特性がよいので，これを用いた20［A］分岐回路は，ヒューズを用いた15［A］分岐回路と同じ負荷容量になっている。

問 4. 単独引込線と連接引込線は，どんな点が違うか。

問 5. 連接引込線の施設に対し，どんな規定があるか。

問 6. 20［A］分岐回路の種類が二つあるが，その違いは何か。

2. 設　　計

（1） 手　　順

屋内配線の設計は，およそ次の順序で行う。

1） 負荷の種類・容量，取り付け位置の決定　2） 回路方式の選定　3） 工事方法の選定　4） 分岐回路の設計

5） 幹線の設計　6） 器具・材料の選定　7） 引込口の設計

まず，建物の平面図に，必要とする負荷を記入する。この場合，各負荷設備を文字で直接記入すると図面が混雑し，わかりにくくなるので，表2に示す日本工業規格（JIS C 0303）で制定されている**屋内配線用図記号**を用いている。

次に，これらの負荷を何個かずつまとめて一つの線で結び，一つの組にする。これを一つの分岐回路とする。分岐回路の分け方には，電灯・コンセントなどのように，負荷の種類別にするとか，間取りにより北側・南側に区分するなどの方法がある。しかし，設計においては，つねに設備を使う者の立場になって考えるべきである。

問 7. 設計において，図記号を用いると，どんな点が便利か。

問 8. 表2のほかに，どんな図記号があるか，調べてみよ。

表 2　屋内配線用図記号の例（JIS C 0303-1984）

名　称	図記号	摘　　要
天井隠ぺい配線 床隠ぺい配線 露出配線	———— — — — --------	(1)　天井隠ぺい配線のうち天井ふところ内配線を区別する場合は，天井ふところ内配線に—·—を用いてもよい。 (2)　露出配線のうち床面露出配線を区別する場合は，床面露出配線に，—··—を用いてもよい。 (3)　電線の種類を示す必要のある場合は，記号を記入する。
電流制限器	Ⓛ	(1)　必要に応じ，電流を傍記する。 (2)　箱入の場合は，その旨傍記する。
VVF用ジョイントボックス	⊘	端子付であることを示す場合は，t を傍記する。 ⊘t
配線用遮断器	B	箱入の場合は，箱の材質などを傍記する。
電力量計	Wh	箱入又はフード付である。
一般用照明 白　熱　灯 HID　灯	○	(1)　壁付は，壁側を塗る ◐ (2)　器具の種類を示す場合は，○ の中か又は傍記によって，かたかな，数字などの文字記号を記入し，図面の備考などに表示する。
蛍　光　灯	▭○▭	(1)　図記号▭○▭は，▭⊖▭で表示してもよい。 (2)　壁付は，壁側を塗る。 横付の場合：▭◒▭ 縦付の場合：◒
コンセント	◐:	(1)　図記号は，壁付きを示し，壁側を塗る。 (2)　図記号 ◐: は，⊜ で表示してもよい。 (3)　天井に取り付ける場合は，次による。 ⊙⊙ (4)　床に取り付ける場合は，次による。 ⊙▲ (5)　容量の表し方は，次による。 a．15Aは傍記しない。 b．20A以上は，アンペア数を傍記する。 例：◐: 20A
配電盤、分電盤及び制御盤	▭	(1)　種類を区別する場合は，次による。 配電盤 ⊠　分電盤 ◪　制御盤 ⧓ (2)　直流用は，その旨を傍記する。

（2） 分岐回路と幹線の設計

分岐回路　回路の容量は，取り付ける負荷の容量とその数で決まるが，一つの分岐回路に接続できる受口数は，表3に示すように決められている。なお分岐回路の必要数は，次の式から求められる。

$$\text{分岐回路の数} = \frac{(\text{床面積}\,1\,[\mathrm{m}^2]\,\text{の標準 VA 数}) \times (\text{床面積})}{1\,\text{分岐回路の VA 数}}$$

例えば，50 [m²] の一般住宅に，100 [V] の電灯配線を行うとき15 [A] の分岐回路数は，次のようにして求められる。

表4を参照することにより，床面積1 [m²] 当りの標準VA数が30であり，加算すべきVA数を500として，$\frac{(30 \times 50) + 500}{15 \times 100} = 1.33$ となり，二つの分岐回路が必要になる。

表 3　分岐回路の最大受口数

<table>
<tr><th>分岐回路の種類</th><th>受口の種類</th><th colspan="2">最大受口数</th></tr>
<tr><td rowspan="4">15 [A]
20 [A]
(配線用遮断器に限る)</td><td>電灯受口専用</td><td colspan="2">制限しない。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">コンセント専用</td><td>住宅およびアパート</td><td>制限しない。ただし，定格消費電力1 [kW] を超える冷房機器・ちゅう房機器などの大形電気機械器具を使用するコンセントは1個とする。</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>10個以下。美容院またはクリーニング店などにおいて，業務用機械器具を使用するコンセントは1個を原則とし，同一室内に設置する場合に限り2個までとする。</td></tr>
<tr><td>電灯受口とコンセント併用</td><td colspan="2">電灯受口は制限しない。コンセントはコンセント専用の欄にならう。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">20 [A]
30 [A]
40 [A]
50 [A]</td><td>大形電灯受口専用</td><td colspan="2">制限しない。</td></tr>
<tr><td>コンセント専用</td><td colspan="2">2個以下。</td></tr>
</table>

（「内線規定」による）

表 4　電灯負荷の床面積1 [m²] 当たりの標準 VA 数

建　物　の　種　類	床面積1 [m²] 当たりの標準 VA 数
工場，公会堂，劇場，ダンスホール，映画館，寄席	10
寮，下宿，旅館，ホテル，病院，喫茶店，飲食店，学校，公衆浴場	20
住宅，アパート，商店，美容院，事務所，銀行	30

注．住宅，アパート（1世帯ごと）の場合は，標準負荷から算出した数値に，1000〜500 [VA] を加算する。

（「内線規程」による）

なお，上の式で，回路数が1と算出されたときでも，最低二つの分岐回路にすることが望ましい。

幹線の設計　幹線の太さは，許容電流・電圧降下・機械的強さなどのほか，将来の増設なども考えて，最大電流を推定して決める。幹線に流れる電流は，次の各方法で計算する。

1)　実際に取り付けられている負荷電流の合計から求める。

2)　受口1個当たりの平均 VA 数に，その幹線の受口数を掛けて求める。

3)　表4に示す床面積1 [m²] 当たりの標準 VA 数に，その幹線の受け持ち面積を掛けて求める。

4)　分岐回路数から推定する。

電灯幹線の場合には，3) の方法が用いられ，動力幹線の場合には，1) の方法が用いられる。このようにして求めた電流値に需要率を掛けたものを，最大電流と決めている。

問 9．分岐回路を最低2回路とするのはなぜか。

（3）住宅電灯の配線図作成の例

図6は，平家建ての住宅の電灯配線図である。この場合の設計要領について調べる。

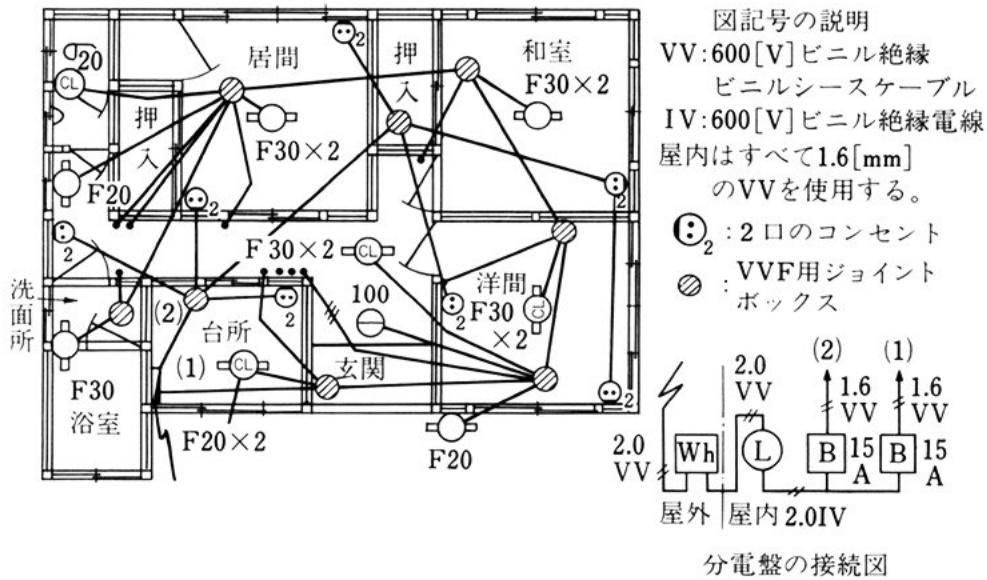



図 6　住宅電灯配線図の例

1)　住宅の平面図を用意する。

2)　電灯の位置と灯具を決め，それを図面に記入する。

3)　点滅器の位置は，使いやすさを考えて，居間を中心にして決める。浴室・洗面所・手洗所の電灯の点滅器の位置は，入口付近の壁にする。各点滅器の位置を記入する。

4)　各部屋のコンセントの位置を決め，図中に記入する。

5)　この建物は 50 [m²] であるから，193 ページで求めたように，$\frac{(30\times50)+500}{15\times100}=1.33$　となり，15 [A] 分岐回路は，2 回路となる。したがって，図 6 に示すように分ける。

6)　各電灯位置までの配線は，単線で，最短距離になるようにかき入れる。

7)　配線の記入が終わったら，電線の条数・太さ・種類を記入する。電線の太さは，最大使用電流および電圧降下の点から考える。また，電線には，600 [V] ビニル絶縁ビニルシースケーブル（VV）や 600 [V] ビニル絶縁電線（IV）などを用いる（196 ペ

ージ参照)。

問 10. 1.6 [mm] の 600 [V] ビニル絶縁電線の許容電流は何アンペアか。

問 11. 点滅器の取り付け場所を決めるとき，考慮すべき点は何か。

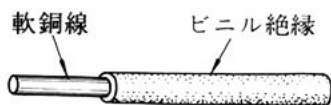
問 12. 浴室や台所などの照明器具には，防水形を使用することになっている。なぜか。

3. 工 事 材 料

(1) 電線・ケーブル・コード

電 線 屋内配線に用いられる電線には，図7に示す 600 [V] ビニル絶縁電線 (IV)，600 [V] ゴム絶縁電線 (RB) などがある。ビニル絶縁電線は，ゴム絶縁電線に比べると，綿編組の必要がないため，仕上りの外径が細くなり，金属管の中に挿入する場合も作業がしやすい。また，絶縁物を自由に着色できるため，色分けができ，工事がしやすい。そのほか，寿命・耐酸・耐アルカリ・耐水性に富むなど，多くの利点があるため，広く使用されている。なお，電線には，㋮の記号，形式認可番号，製造者名などを入れるように決められている。

ケーブル 屋内配線に用いられているケーブルには，図8に示す 600 [V] ビニル絶縁ビニルシースケーブル(VV)，600 [V] ブチル

図 7 低圧屋内配線用電線

(a) 600 [V] ビニル絶縁電線(IV)

(b) 600 [V] ゴム絶縁電線(RB)

(a) 600 [V] ビニル絶縁ビニルシースケーブル(VV)

(b) 600 [V] ブチルゴム絶縁クロロプレンシースケーブル(BN)

図 8 低圧屋内配線用ケーブル

(a) 袋打コード　(b) 丸打コード

(c) 平形ビニルコード　(d) 電熱用コード

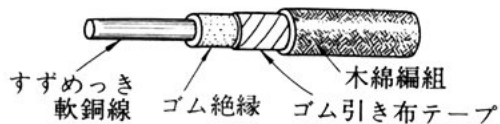
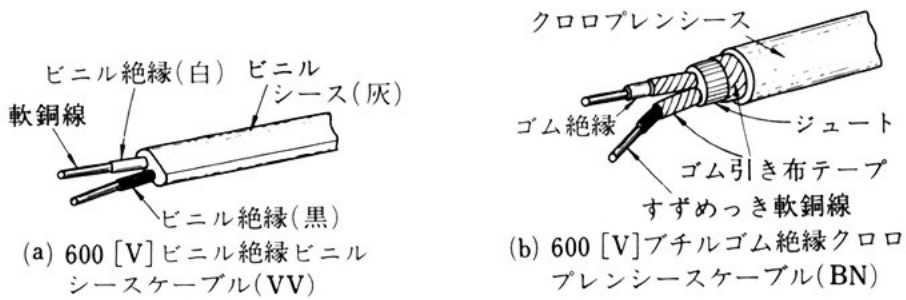
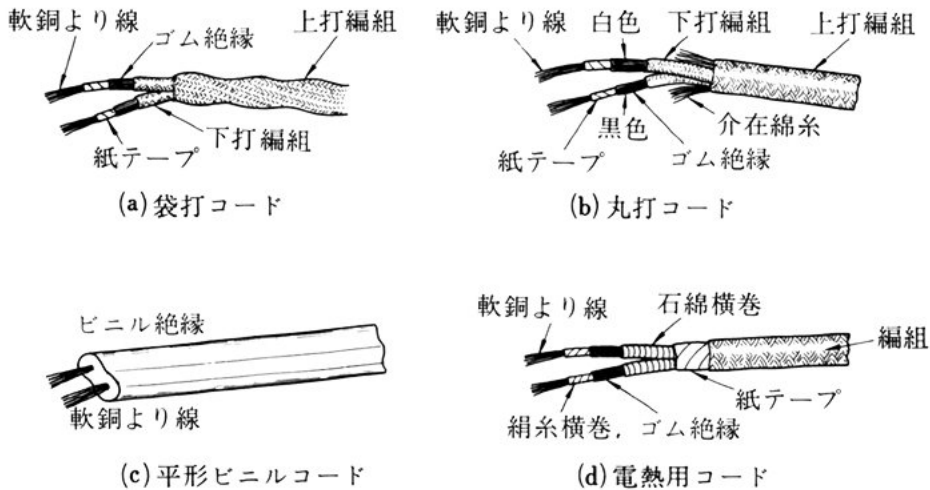



図 9 各種コードの構造

ゴム絶縁クロロプレンシースケーブル (BN) などがある。

VV ケーブルは，図(a)に示すように，軟銅線の心線をビニルで絶縁し，これを 2～4 条並べ，その上にさらにビニルシースを施した構造になっており，平形と丸形がある。平形は VVF ケーブル，丸形は VVR ケーブルとよばれる。

コード　屋内の**電球線***や移動電線には，図 9 (a)，(b) に示す袋打コードや丸打コードが使われる。ラジオ受信機・扇風機などのように，電気を熱として利用しないものには，図 (c) に示す平形ビニル

---

* 造営物に固定しない白熱電灯に至るコードなど，造営物に固定して施設しない電線。

コードが使われ，電熱器には図(d)に示す電熱用コードが使われる。

また，小形電気機器の移動用には，ビニルキャブタイヤコードやゴムキャブタイヤコードが使われる。

なお，一般家庭に使用されているコードの太さは0.75 [mm^2] であり，許容電流は7 [A] である。

問 13. 屋内配線に用いる電線は軟銅線である。なぜか。

問 14. ビニル絶縁電線は，ゴム絶縁電線に比べて，どんな点が優れているか。また，ビニル絶縁電線は着色しやすいが，このことは，どんな点で都合がよいか。

問 15. ゴム絶縁電線にはすずめっきをした軟銅線を用いるが，ビニル絶縁電線には，めっきしないものを用いる。なぜか。

問 16. 電熱用コードは，袋打コードと比べて，構造上どんな点に違いがあるか。図9を参考にせよ。

(2) 電　線　管

電線管は，電線を施設するときに電線を収めるもので，金属管(鋼

表5 電線管の寸法

厚鋼電線管

呼び方 [mm]	外径 [mm]	厚さ [mm]
16	21.0	2.3
22	26.5	2.3
28	33.3	2.5
36	41.9	2.5
42	47.8	2.5
54	59.6	2.8
70	75.2	2.8
82	87.9	2.8
92	100.7	3.5
104	113.4	3.5

薄鋼電線管

呼び方 [mm]	外径 [mm]	厚さ [mm]
15	15.9	1.2
19	19.1	1.6
25	25.4	1.6
31	31.8	1.6
39	38.1	1.6
51	50.8	1.6
63	63.5	2.0
75	76.2	2.0

(JIS C 8305-1982 による)

(a) 絶縁ブッシング　(b) ロックナット　(c) スイッチボックス　(d) サドル

図 10 電線管の付属品

管)と合成樹脂管がよく用いられる。これらは，日本工業規格によって作られる。金属管には，表 5 に示す厚鋼と薄鋼の 2 種類がある。厚鋼は，コンクリートの中に埋め込む場合に用いられ，薄鋼は，露出配管に用いられる。電線管を施設するのに用いる多くの付属品の規格も JIS で定められている。図 10 は，その付属品の一部である。絶縁ブッシングは，金属管の端末に用いられ，管内からの引出し線(絶縁電線) の絶縁の保護をしている。

問 17. 金属管を施設する場合に用いる付属品には，図 10 で挙げたもののほかに，どんなものがあるか。

(3) 絶 縁 材 料

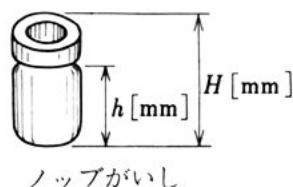
低圧屋内配線に用いられる絶縁材料には，ノップがいし・ビニルチューブ・がい管・ビニルテープなどがある。

ノップがいしは，表 6 に示すがいしで，これを木ねじで造営材に取り付け，上部の溝に電線を入れ，バインド線とよばれる直径 0.9 [mm] の絶縁電線でしばり，配線を固定する。表 6 に示すノップがいしは，電線の太さによって使い分ける。

がい管は，電線の造営材に接近したり，電線が造営材を貫通するときなどに使われ，図 11 に示す細長い管である。

図 11 が い 管

表 6　ノップがいしの種類と電線の太さ

ノップがいし

がいしの種類	使用できる電線の最大の太さ [mm^2]	がいしの高さ H [mm]	電線みぞ下端までの高さ h [mm]
小ノップ	14	42	27
中ノップ	50	50	27
大ノップ	100	57	27
特大ノップ	250	65	27

(「内線規程」による)

また，最近は，ビニルチューブが多く使われるようになった。

ビニルテープは，絶縁電線の接続部分を他の被覆部分と同じに絶縁するために巻くものである。厚さが 0.2～0.3 [mm]，幅 19 [mm] のフィルム状になっており，片面に粘着剤が塗ってある。

4. 配線器具

(1) 自動遮断器

屋内配線の引込口および幹線から分岐する分岐回路には，開閉器および過電流遮断器を施設しなければならない。

ヒューズは，回路に過電流が流れたとき，ジュール熱のために溶けて切れ，自動的に過電流を遮断し，機器や配線の過熱を防ぐ安全装置である。屋内配線には，図 12 に示す糸ヒューズ・板ヒューズ・筒形ヒューズが用いられる。各種ヒューズの溶断時間は，表 7 に示すように定められている。

①糸ヒューズ　②板ヒューズ　③，④筒形ヒューズ

図 12　ヒューズの種類

図 13　配線用遮断器

配線用遮断器は，開閉器と過電流遮断器とを兼ねるもので，ノーヒューズブレーカ（NFB）ともよばれる。その動作機構は，過電流が流れると，電磁力で接点を切り離すようになっているため，ヒューズのように取り換える必要がなく，簡単に手動で復帰できる。したがって，一般住宅の分岐回路に用いられる。

表 7　ヒューズの溶断時間

定格電流の区分	最大溶断時間		定格電流の1.1倍
	定格電流の1.6倍	定格電流の2倍	
30［A］以下	60分	2分	溶断しないこと
30［A］を超え60［A］以下	60分	4分	
60［A］を超え100［A］以下	120分	6分	
100［A］を超え200［A］以下	120分	8分	
200［A］を超え400［A］以下	180分	10分	
400［A］を超え600［A］以下	240分	12分	
600［A］を超えるもの	240分	20分	

（「電気設備技術基準第38条」による）

電流制限器は，需要家が，電力会社と契約した契約電流以上の電流を使用すると，自動的に回路を遮断するもので，屋内の分電盤に取り付けてある。動作機構には，バイメタル式と電磁式がある。バイメタル式のものは，数十秒たつと自動的に復帰するが，電磁式のものは，手動で復帰しなければならない。

漏電遮断器は，分電盤に設置し，漏電したり過電流が流れると，自動的に回路を遮断するものである。漏電すると黄ボタンが凸(とつ)になる。一般家庭では，定格感度電流 30 [mA] のものが用いられる。

問 18． ヒューズの使用目的は何か。

問 19． ヒューズは図 12 に示すもののほかに，どんなものがあるか。

問 20． 電流制限器の使用目的は何か。

（2） 開　閉　器

屋内配線では，各分岐点または各負荷ごとにヒューズが内蔵された開閉器を設けるが，動力負荷の開閉器には，カバー付ナイフスイッチ・金属箱開閉器などが用いられる。また，電灯などには，点滅器が用いられる。

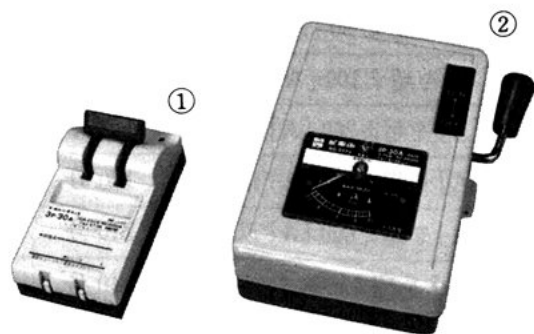
カバー付ナイフスイッチは，図 14 ① に示すスイッチで，動力分電盤や電灯・電熱線などの，電流容量の大きな回路に用いられる。二極用と三極用があり，機器や配線を過電流から保護するために，ヒューズが取り付けられている。

① カバー付ナイフスイッチ　② 金属箱開閉器

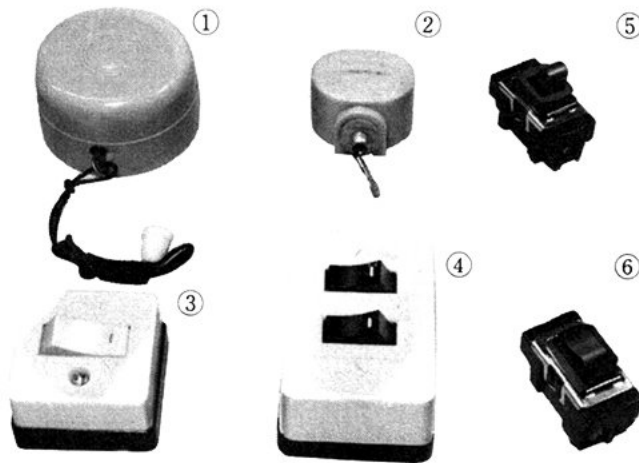
図 14　開　　閉　　器

①プルスイッチ　②キャノピスイッチ　③露出タンブラスイッチ
④露出二連タンブラスイッチ　⑤片切り(埋め込み)スイッチ
⑥ 3路(埋め込み)スイッチ

図 15　各種の点滅器

金属箱開閉器は，図 14②に示すスイッチで，外部のハンドルによって回路を開閉する。電流計や充電表示灯がついており，電動機の手元開閉器として，広く用いられる。

点滅器は，電灯や小形電気機器に用いられるスイッチで，電流容量は 10〜20 [A] のものがある。図 15 は点滅器の例である。点滅器には，用途・使用場所などによって，いろいろな種類がある。例えば，階段の上と下の 2 か所で点滅する場合には，図⑥の 3 路スイッチが使われる。

問 21.　金属箱開閉器は，ナイフスイッチに比べてどんな点で使いやすいか。

(3) 接　続　器

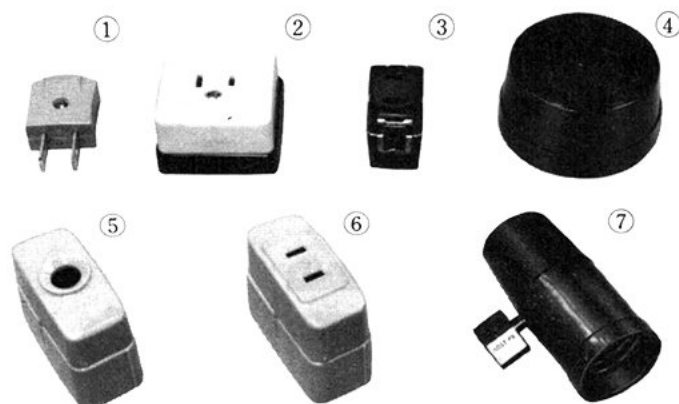
屋内配線と電気器具用のコード，コードとコード，またはコードと負荷などを接続するため，図 16 に示す接続器が用いられる。接

①プラグ　②露出コンセント　③埋め込みコンセント　④ねじ込みローゼット
⑤引掛けローゼット　⑥引掛けローゼットコンセント　⑦キーソケット

図 16　プラグとコンセント

続器は絶縁されており，取り扱いに危険のない構造になっている。また，露出形と埋込形とがあり，用途に応じて使い分ける。

プラグとコンセントは，屋内配線とコードを接続する箇所に使う接続器である。**プラグ**(図16①)は，電気アイロンやラジオ受信機などの電気器具のコードの先端に取り付けて，これを壁や床に施設した**コンセント**（図②，③）に差し込んで使う。

ローゼットは，天井の下面に取り付けて，屋内配線と電球線を接続する器具で，磁器製・尿素樹脂製のものがある。ローゼットには，ねじ込みローゼット(図④)，引掛けローゼット(図⑤)，引掛けローゼットコンセント（図⑥）などの種類がある。

ソケット(図⑦)は，電球線の先端に取り付け，電球を保持するために用いる。口金の大きさには，大形(公称直径39 [mm])・並形(公称直径26 [mm]）などがある。一般に並形が用いられる。

問 22.　コンセントには，どんな種類（極数・電流容量など）があるか。

5. 配 線 工 事

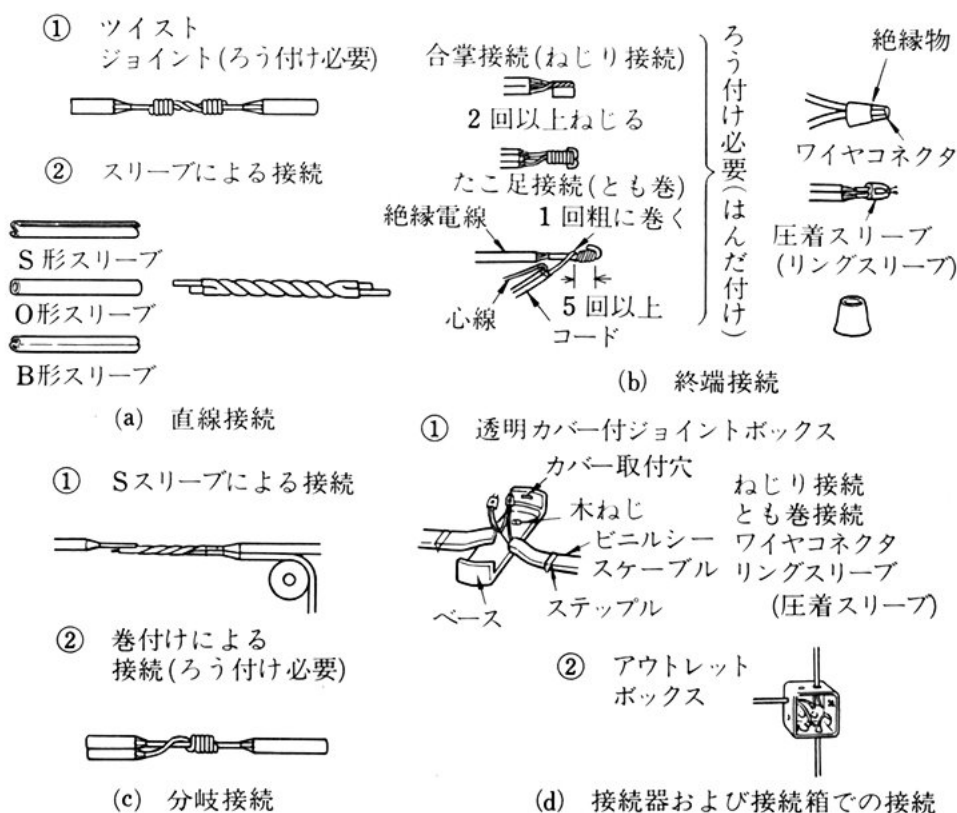
(1) 電線の接続法

電線の接続法には，次の規定* があるので，これを守らなければならない。

1) 電線の電気抵抗を増加させないこと。

2) 電線の引張り強さを 20 [%] 以上減少させないこと。

3) 接続部分は，接続管その他の器具を使用するか，ろう付けすること。

図 17 電線の接続例

* 電気設備技術基準第 12 条。

4)　接続部分は，絶縁電線の絶縁物と同等以上の絶縁耐力のある接続器を使用するか，絶縁物でじゅうぶん被覆すること。

いろいろな接続法　電線の接続には，単に電線相互をつなぐ**直線接続**と**終端接続**があり，また電線の途中から分岐線を引き出すための**分岐接続**がある。図17は代表的な接続の例である。

（2）施設場所とそれに適した工事の種類

低圧屋内配線の施設場所には，展開した場所，点検できるいんぺい場所および点検できないいんぺい場所の三つが考えられる。これらの場所には，表8に示す配線工事の方法があり，この中から適切なものを選んで施工するように定められている*。したがって，配線工事施工者は，この規定に従って行わなくてはならない。なお，屋内配線工事に使用する電線は軟銅線であり，その太さは，最小1.6[mm]と決められている。

問 23.　すべての場所に施工できる工事方法を三つ挙げよ。

問 24.　電線接続上守らなければならない事項を挙げよ。

問 25.　スリーブには，どんな種類があるか。

（3）各種配線工事のあらまし

がいし引き工事**は，表8からわかるように，展開した場所，および点検できるいんぺい場所に施工することができる。がいしで電線を支持して配線するもので，施工が簡単で工事費が安いなどの利点がある。しかし，電線を露出して配線するので，人が配線に触れて感電したり，あるいはこれを損傷したりするおそれがある。また，体裁がわるいなどの欠点も多い。そのため，現在では，がいし引き工事に代わって，ビニルシースケーブル工事が多く行われている。

---

*　電気設備技術基準第189条。

**　電気設備技術基準第190条。

表 8　施設場所と工事の種類

施設場所／条件／工事方法	展開した場所		いんぺい場所			
			点検できる		点検できない	
	乾燥した場所	湿気・水気のある場所	乾燥した場所	湿気・水気のある場所	乾燥した場所	湿気・水気のある場所
がいし引き工事	○	○	○	○		
合成樹脂線ぴ工事	△		△			
金属線ぴ工事	△		△			
合成樹脂管工事	○	○	○	○	○	○
金属管工事	○	○	○	○	○	○
可とう電線管工事　1 種	◎		◎			
可とう電線管工事　2 種	○	○	○	○	○	○
金属ダクト工事	○		○			
バスダクト工事	○		○			
フロアダクト工事					△	
ライティングダクト工事	○		○			
平形保護層工事	△		△			
ケーブル工事	○	○	○	○	○	○

備　考　(1)　点検できるいんぺい場所：点検口のある天井裏，戸棚，押入れなど接近または検視できる場所のこと。

(2)　点検できないいんぺい場所：点検口のない天井のふところ，床下，壁内，コンクリート床内などのように破壊しなければ接近または検視できない場所のこと。

(3)　展開した場所：(1)，(2)以外の場所。

(4)　○は施工が可能。△は使用電圧 300 [V] 以下ならば可能。

◎使用電圧が 300 [V] を超える場合は，電動機に接続する部分で可とう性を必要とする部分に限る。

空欄は施工が不可能。

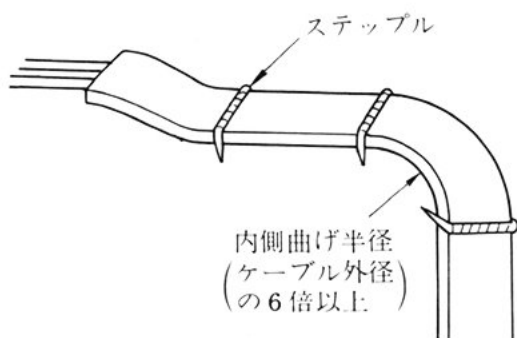
ケーブル工事*には，ビニルシースケーブルが最も多く使われている。図 18 に示すように，ケーブルをステップルで，造営材に直接取り付け配線をする工法である。

ケーブル支持点間の距離は，造営材の下面または側面に沿って取

* 電気設備技術基準第 201 条。

り付ける場合は2[m]以下，垂直の場合で，しかも人が触れるおそれがないときは6[m]以下となっている。

図 18　ケーブル工事

また，ケーブルが外圧を受けるおそれがあるときは，適当な防護装置を設けることや，工事上ケーブルを屈曲して使用する場合，屈曲部の内側半径をケーブル外径の6倍以上にするなどの規定がある。いずれにしても，ケーブル被覆に損傷を与えないように工事することが大切である。

金属管工事*は，金属管をコンクリートに埋め込むか，または造営材に直接取り付けて，管内に電線を施設する工事であり，図19は，その例である。この工事は，あらゆる施設場所に施工できる。工事に用いる電線は絶縁電線(屋外用ビニル絶縁電線は除く)で，より線を用いることになっているが，短小な金属管に収める場合や，直径が3.2[mm]以下の場合は単線でもよい。電線は，ボックス内で接続し，金属管内で接続してはならない。また，金属管の厚さは，埋め込み工事では1.2[mm]以上，その他は1[mm]以上のものを用いることになっている。この工事には，金属管およびボックスその他多くの付属品が必要であるが，これらは電気用品取締法**の適用を受けたものを使用する。

なお，電線の絶縁が劣化して，金属管に漏電した場合の危険を防

*　電気設備技術基準第194条。

**　電気用品取締法については，238ページで学ぶ。

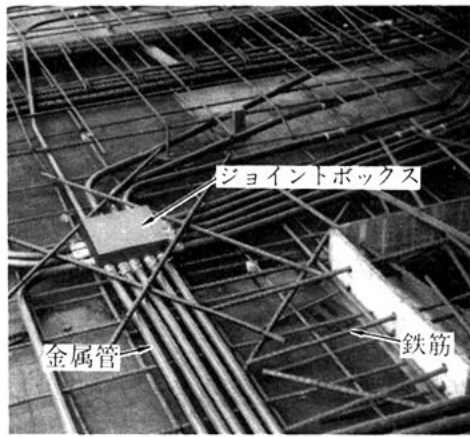
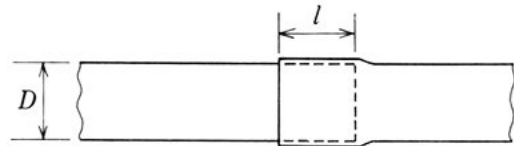
(a) 一般家屋の場合

(b) ビルディングの場合

図 19 金属管工事の例

止するため，使用電圧が 300 [V] 以下の配管には第 3 種接地工事を施し，300 [V] を超える配管には特別第 3 種接地工事を施す。

合成樹脂管工事*は，合成樹脂製の電線管を用いて配線を行う工事で，金属管工事と同じように，あらゆる施設場所で施工できる。合成樹脂管は，金属管に比べて，大きな機械的衝撃や熱に対しては劣るが，薬品や油などに対して腐食されず，絶縁性にも優れている。

l：差し込み深さ
D：管の外径

接着剤を使用しない場合　$l \geqq 1.2D$
接着剤を使用する場合　$l \geqq 0.8D$

図 20 合成樹脂管の差し込み接続

施工上，次の規定がある。

1) 電線には，絶縁電線のより線を用いる。ただし，短小な管に

* 電気設備技術基準第 193 条。

収めるもの，または，直径 3.2［mm］以下のものは単線でよい。

2） 合成樹脂管の接続においては，管相互および管とボックスとは，管の差し込み深さ l を管の外径 D の 1.2 倍(接着剤を使用するときは 0.8 倍）とする（図 20 参照)。

3） 管の支持点間の距離は 1.5［m］以下とする。

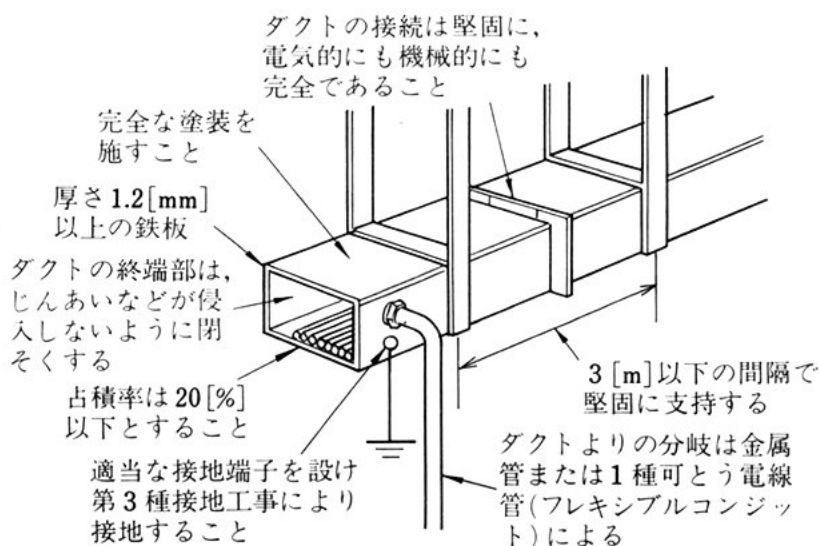
4） 管の屈曲部の半径は管の内径の 6 倍以上とする。

ダクト工事は，工場やビルディングなどにおいて，変電室から幹線の部分，工場の多数の機械装置への配線などのように，多くの屋内低圧配線を引き出す場合に，これまで金属管を何十本も使って施設していた。これらの配線を一つのダクトに収めて施設する工事方法である。

ダクト工事には，金属ダクト工事，バスダクト工事，フロアダクト工事，セルラダクト工事，ライティングダクト工事などがある。

以下，各種の工事の概要と特長などについて学ぶ。

金属ダクト工事*は，亜鉛めっきしたダクトに電線を収めるダクト

図 21 金属ダクト工事

＊ 電気設備技術基準第 197 条。

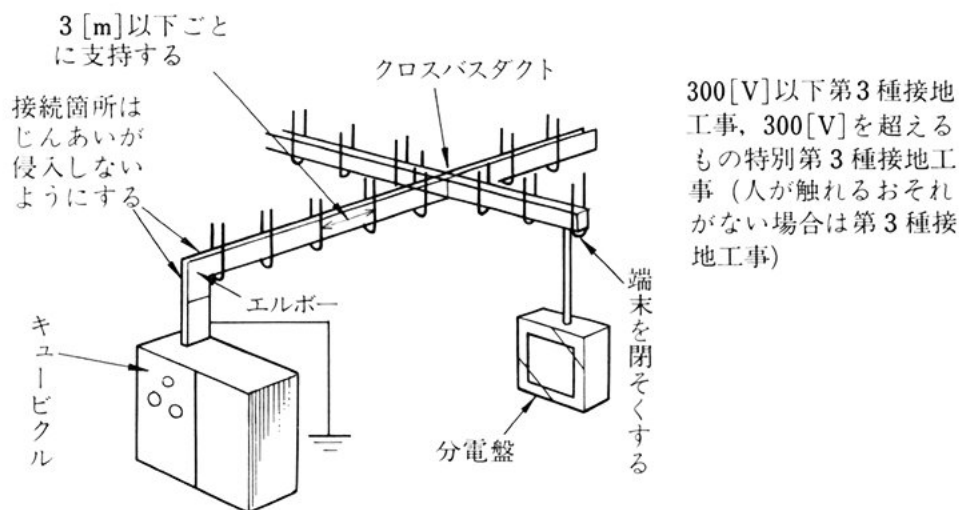



図 22　バスダクト工事

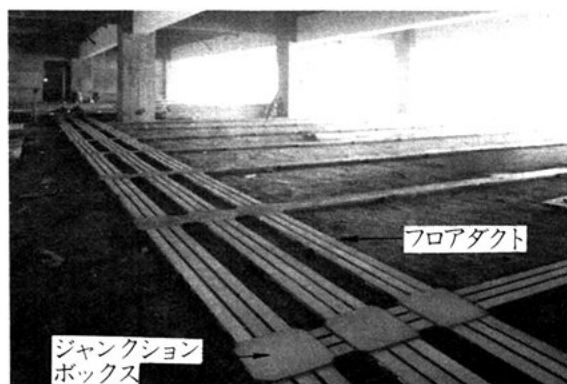



図 23　フロアダクト工事の例と部品

工事で，表8に示す場所で施設する。図21は，この施設例である。

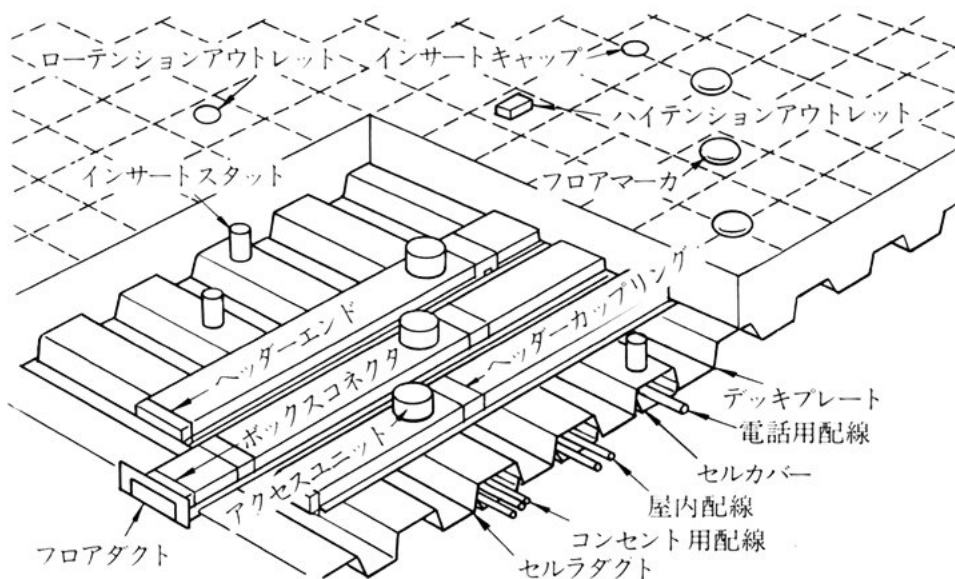
バスダクト工事*は，バスダクトを用いたダクト工事で，バスダクトとは，金属製のダクトの中に裸電線を収め，絶縁物で適当な間隔で支持したものである。主幹に用いるフィーダバスダクト，差し込み装置によって分岐できるプラグインバスダクトなどがある。図22は，バスダクト工事の例で，比較的大電流が流れる屋内幹線を施設する場合に用いられる。

*　電気設備技術基準第198条。

フロアダクト工事[*]は，鉄筋コンクリート造りの事務室などで，必要に応じて床上随所で，電気スタンドや電話などのいろいろな電気機器を使用するため，コンクリート床内にフロアダクトを埋め込み，その中に電線を施設する工事である。図23はその例である。

セルラダクト工事[**]は，超高層ビルディングなどの鉄骨造建築物の床コンクリートの仮枠または床構造材として使用される波形鋼板の溝を閉鎖して，これに電線を通して使用するダクト工事である。図24はその例である。

ライティングダクト工事[***]は，バスダクト工事の一種で，照明器具や電気機器をどこからでも分岐できるようにするために開発されたダクト工事である。

図 24　セルラダクト工事の例

* 電気設備技術基準第199条。

** 電気設備技術基準第199条の2。

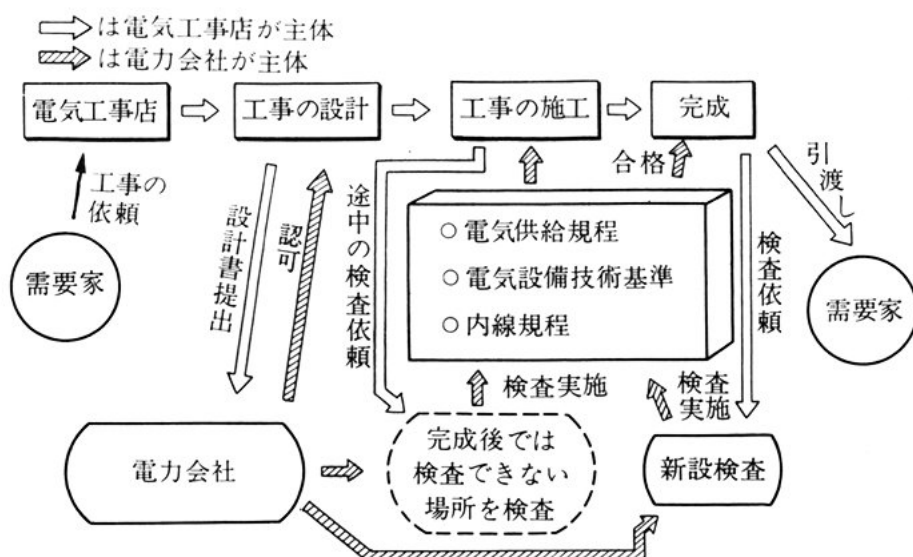
*** 電気設備技術基準第200条。

6. 配線設備の検査

(1) 新　設　検　査

新設検査は，屋内配線工事が終わって，電力の供給を受ける直前に行う検査であり，点検検査，導通試験，絶縁抵抗の測定などがある。しかし，コンクリート埋め込み工事の金属管や点検できないいんぺい場所の工事などは工事完了後では点検できないので，必要に応じて工事中に検査を行う。

点検検査は，電力会社の係員が電気設備技術基準・内線規程などに基づいて行う検査である。完成した配線工事を設計図と照合しながら，工事方法の適否，電線やその他の材料に粗悪な品を使っていないか，配線器具や照明器具の取り付けが正しく行われているか，などを検査する。図 25 は，配線工事の新設検査の手順を示している。すなわち，電気工事店は，需要家から工事を依頼された場合，設計書を作成して電力会社にその工事の申請をし，認可をもらって

図 25　工事の施工と検査の流れ図

工事に着手する。そして，電気工事店は，工事を終了すると，電力会社の検査を受け，合格後，需要家に引き渡す。

導通試験は，測定器によって，配線の断線・短絡・誤接続の有無を調べる試験である。

屋内配線の絶縁がじゅうぶんでないと，漏れ電流による火災や感電の危険がある。このような危険を防ぐために，**絶縁抵抗の測定**を行う。測定器にはメガーを用いる。測定回路の電圧に応じて100［V］, 250［V］, 500［V］, 1000［V］, 2000［V］用の5種類がある。低圧屋内配線では，250［V］あるいは500［V］用のメガーを用い，電線相互間および電路と大地間について測定する。

電線相互間の絶縁抵抗の測定は，図26に示す電球や電気機械器具をはずし，スイッチSを①側に倒して，電球線・屋内配線などの電線だけについて行う。

また，電路と大地間の絶縁抵抗の測定は，電気機械器具を使用している状態のままで，スイッチSを②側に倒して行う。この場合，屋内配線・電球線・電気器具類も含めた，すべての絶縁抵抗値が測

図 26　屋内配線の絶縁抵抗の測定

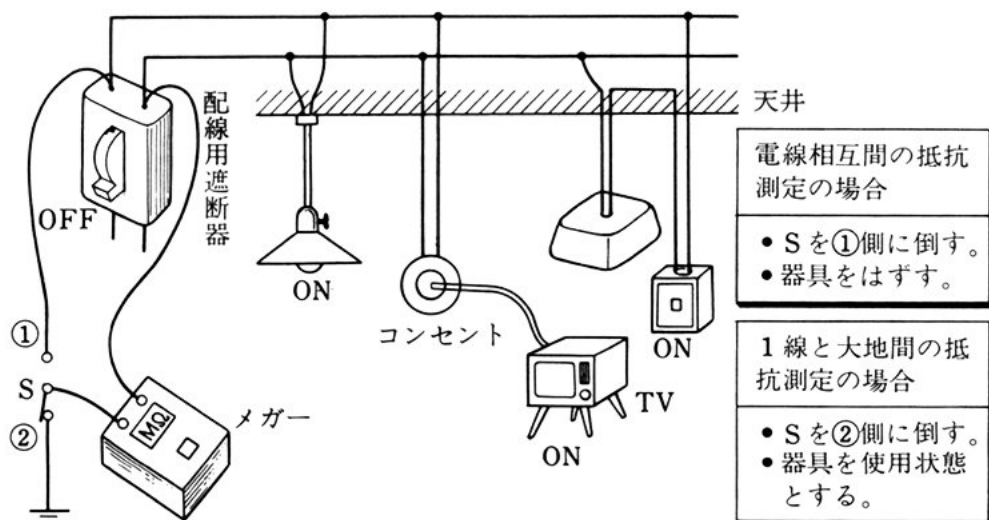
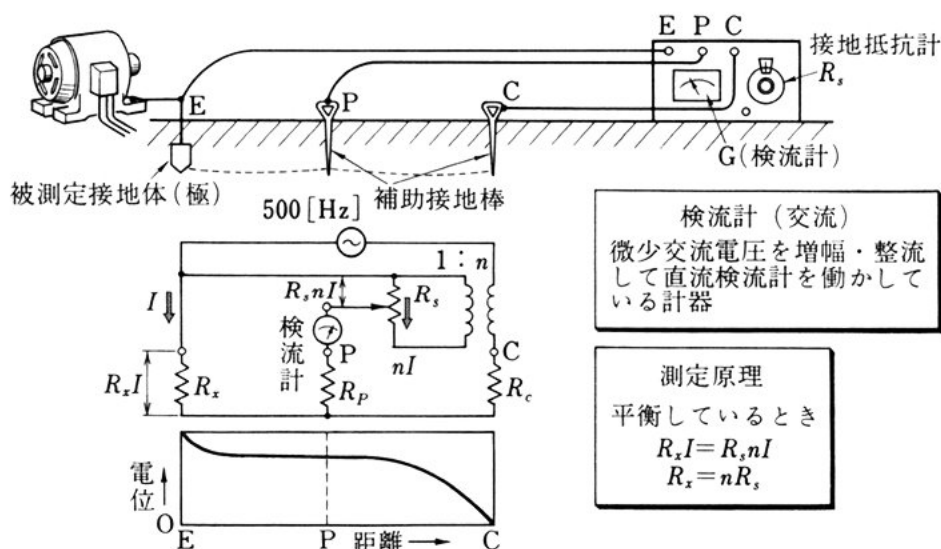



図 27 接地抵抗の測定

定できる。

接地工事を行った場合には，**接地抵抗の測定**を行う。接地抵抗の測定は，被測定接地体(極)から 5〜10 [m] の間隔に，ほぼ一直線上になるように，補助電極 P および C を埋め込み，付属のリード線を用いて図 27 のように接続し，可変抵抗 R_s を調整して，検流計の指示が 0 になるようにする。このときの R_s の読みが，この場合の接地抵抗値である。なお，この値は，接地工事の種類によって決められている接地抵抗値以下でなくてはならない。例えば，第 3 種接地工事であれば，接地抵抗値は 100 [Ω] 以下でなければならない。

問 26. 新設検査の目的は何か。また，主な試験項目を挙げよ。

問 27. ある機器または回路において，絶縁抵抗値が大きいということは，どういうことを意味するか。

問 28. ある屋内配線の絶縁抵抗値を 250 [V] 用メガーで測定したら，その値が 0.25 [MΩ] であった。この回路の漏れ電流はいくらか。

問 29. 接地工事の種類を挙げ，それぞれの接地抵抗値をいえ。

（2）定　期　検　査

新設検査では完全であった屋内配線でも，使用しているうちに，電線やコードの絶縁が劣化し，また，配線器具の破損や接触不良などにより，短絡を起こして，火災の生じる危険がある。このような原因で起こる事故を事前に防ぐために行う検査を**定期検査**といい，隔年に1回以上，配線・配線器具の点検および，絶縁抵抗の測定などを行う。また，必要に応じて定期検査とは別に臨時検査を行うことがある。検査の内容は，検査目的によって異なる。

問　　題

1. 図28は，単相三線式の電線路である。次の問いに答えよ。

(1) 外線と中性線が同一材質の電線である場合，中性線の太さは，外線の何倍か。

(2) 負荷の端子電圧 V_{21} および V_{22} はいくらか。

(3) ヒューズ F_a が溶断した場合，V_{22} はいくらか。

2. 分岐回路には，どのような種類があるか。

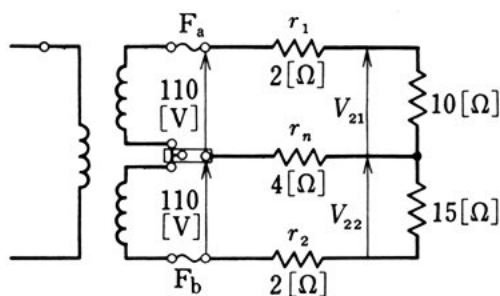
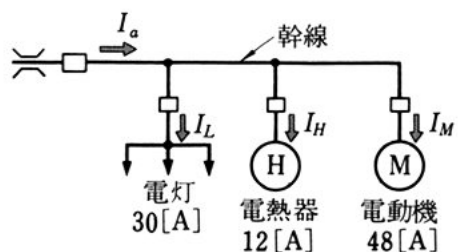



図 28

電気設備技術基準抜すい

$I_M < I_L + I_H$ のとき，$I_a = I_L + I_H + I_M$

$I_M > (I_L + I_H)$ のとき

$I_a = I_L + I_H + 1.25\,I_M\ (I_M < 50\,[\mathrm{A}])$

$I_a = I_L + I_H + 1.1\,I_M\ (I_M > 50\,[\mathrm{A}])$

図 29

3. 図29は，一つの幹線から電灯・電熱器および，電動機に電力を供給している屋内配線の例である。この幹線の最大電流はいくらか。ただし，計算は，電気設備技術基準に基づいて行え。

4. 点検できるいんぺい場所について，具体例を挙げて説明せよ。

5 **5.** 点検できないいんぺい場所について，具体例を挙げて説明せよ。

6. VVFケーブルとは，どのようなものか。

7. 一つの電灯を，3路スイッチ2個を用いて，2か所から点滅できる回路図をかけ。

8. コードの種類を挙げ，それぞれの用途をかけ。

10 **9.** NFBについて説明せよ。

10. 次に挙げた工事について，簡単に説明せよ。

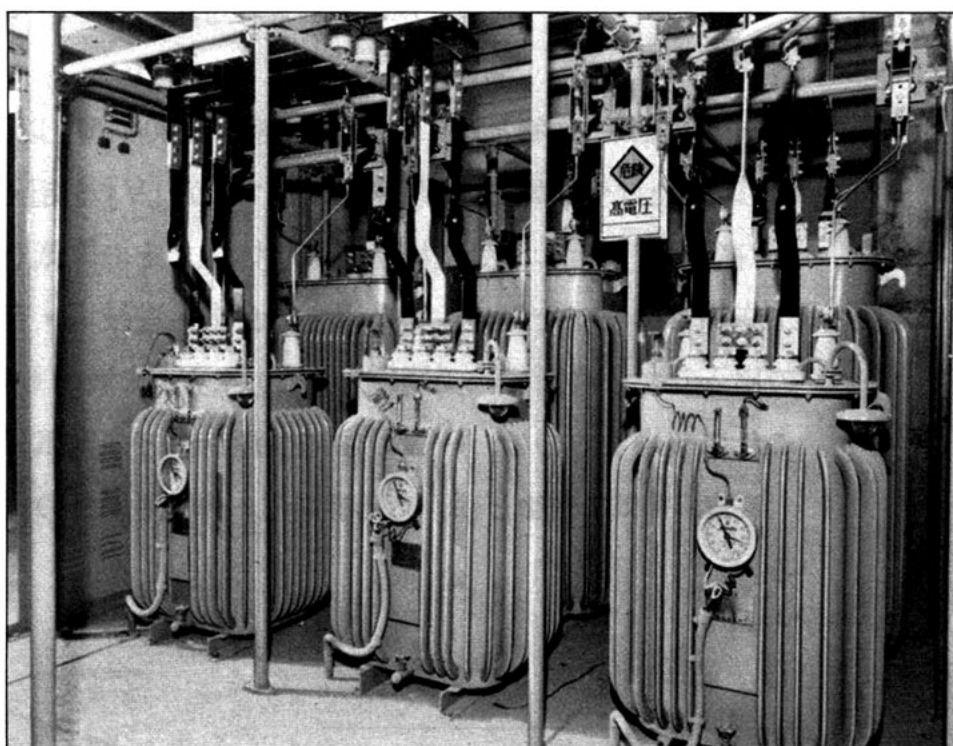
(1) がいし引き工事　　(2) 金属管工事

(3) ケーブル工事　　(4) 金属ダクト工事

第12章

電気関係法規

すでに学んだように，発電・変電・送電・配電などの電気事業を円滑に行うために，電気に関係したいろいろな法規がある。

ここでは，電気事業法・電気設備技術基準・電気工事士法・電気用品取締法などについて調べ，電気事業の重要性を知るとともに，電気施設の保安に関する規制の必要性を理解する。

安全表示

1. 電気事業法

（1） 電気事業と電気工作物*

電気事業には，一般電気事業と卸電気事業とがある。

一般電気事業とは，一般の需要に応じて電気を供給する事業で，これを営む一般電気事業者としては，全国で10社の電力会社がある。

卸電気事業とは，一般電気事業者に事業用の電気を供給することを目的とする事業で，これを営む卸電気事業者は，民間で20社以上，公営で30事業所以上に及ぶ。

電気工作物とは，発電・変電・送電・配電，または電気の使用のために設置する機械・器具・ダム・水路・貯水池・電線路その他の工作物である。ただし，船舶・車両・航空機に設置されるものなどは除かれる。なお電気工作物は，次の三つに分類される。

電気事業用電気工作物とは，電気事業に用いられる電気工作物である。

一般用電気工作物とは，電気事業者から600［V］以下（低圧）で受電し，または受電電力50［kW］未満で600［V］を超え，7000［V］以下（高圧）で受電し，受電場所と同じ構内でその電気を使用する電気工作物である。ただし，興業場・公会堂・遊技場・百貨店など公衆の出入りする場所では受電電力が20［kW］未満のものに限られる。これに該当するのは，一般の住宅や商店などの電気設備である。

自家用電気工作物とは，電気事業用，一般用以外の電気工作物である。

---

* 電気事業法第2条および第66条。

(2) 電気事業の特質

電気は，日常生活において欠くことができないばかりではなく，産業界においても非常に重要なエネルギー源として，広く利用されている。この電気を発生し，輸送し，各利用先に配って電気を供給する事業が電気事業である。したがって，電気事業は，他の事業にはみられない特徴をもっている。

公益性　電気の質，電気料金その他電気の供給条件などの適・不適は，日常生活，産業および公共の利益に大きな影響を与える。このようなサービス財（電気・ガス・水道など）を供給する企業を**公益事業**という。これらの供給は，一般国民に対し，広く，均等に，利益を直接与える形でなされなくてはならない。このことから電気事業は，典型的な公益性をもっているといえる。

独占性　電気事業は，公益性が高いため，自由競争によって起こる国民の不利益をなくすよう，現在では，一般電気事業者に一定の地域を独占させ，営業地域とすることが法律で定められている。そして，一方では，独占事業であるために生じやすいサービスのわるさ，不公平な取り扱いなどを防ぐために，需要家に対するサービスの確保，料金の公正，電気施設の安全管理などが法律で義務づけられている。

危険性　電気施設が不完全な場合，漏電によっていろいろな災害が発生するおそれがある。また，電話やラジオ受信機などの工作物に誘導障害を与えることがある。このようなことから，電気工作物に対する保守・保安について，法規で規定が設けられている。

問 1.　公益性とは何か。

問 2.　公益事業には，どのようなものがあるか，調べてみよ。

（3）電気事業法の目的

電気事業には，すでに学んだ特徴があるため，これを考慮して，電気事業法の第1条に，この法律の目的が述べられている。

「電気事業の運営を適正かつ合理的ならしめることによって，電気の使用者の利益を保護し，および電気事業の健全な発達を図るとともに，電気工作物の工事，維持および運用を規制することによって，公共の安全を確保し，あわせて公害の防止を図ること」。

この目的を達成するために，電気事業法は，次のことに主眼をおいて制定されている。

運営の適正と合理化　電気事業は公益事業であるから，事業者の乱立による無用な競争と混乱を避けるため，電気事業を営もうとする者は，通商産業大臣の許可を受けなければならない（第3〜6条）。

また，電気事業者は，需要家に電気を供給する義務（第18条）があり，電気の供給を円滑にするために，供給の種別，電気料金，その他の供給条件について規定を定め，通商産業大臣の許可を得る必要がある（第19条）。

さらに，近年，発送電技術の進歩および，電力系統の大容量化に伴って，全国的視野からその経済性を追求すること（広域的運営）が，電気利用者の利益のためにも，電気事業全体のためにも，強く望まれている。このことから，電気事業者は，毎年，その年以降2年間の施設計画と供給計画を通商産業大臣に届け出することが義務づけられており，その計画が広域的運営による電気事業の発達を図るために適切でないときは，計画の変更が勧告される（第28，29条）。

電気使用者の利益保護　これに関係するものとしては，例えば，

表1 電圧および周波数

種 別	標準値	維持すべき値
電 圧 [V]	100	101 [V] の上下 6 [V] を超えない値
	200	202 [V] の上下 20 [V] を超えない値
周波数 [Hz]	50 または 60	——

(「電気事業法施行規則第25条」による)

供給電圧や周波数を規定する値に維持すること (第26条) となっており，具体的な値は表1に示す。また，通商産業大臣が，使用者の利益を阻害していると認めたときには，業務の改善を命ずること(第31条) ができる。

電気に起因する災害・障害の防止　これに関しては，電気工作物の維持 (第48条)，電気設備技術基準への適合命令 (第49条) がある。また，電気工作物の工事，維持および運用に関する保安を確保するため，保安規定を定め，届け出なければならない (第52条) ことや，保安の監督をさせるため，電気主任技術者を選任 (第53条) することなどの規定がある。

問 3. 電気事業者に，業務の改善を命ずることのできるのはだれか。

(4) その他電気に関する法令

電気に関する法令には，表2に示す政令や省令のほか，電気施設の保安に関するもの，電気の計測に関するものなどがある。

電気施設の保安に関するもの　電気事業法に含まれているもののほか，電気用品取締法・電気工事士法などがある。

計量器の検定に関するもの　電気に関する諸量の計量単位を定めるとともに，電気の取り引きを公正に行うために制定された計量法がある。

問 4. 電気に関する法令には，どのようなものがあるか。

表 2　電気事業法に関する政令および通商産業省令

政令・通商産業省令	
政　令	(6) 発電水力流量測定規則
(1) 電気事業法施行令	(7) 渇水準備引当金に関する省令
(2) 電気事業法関係手数料令	(8) 電気事業会計規則
(3) 電気事業法付則第11項の規定による登記の手続に関する政令	(9) 電気設備に関する技術基準を定める省令
	(10) 電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令
通商産業省令	(11) 発電用水力設備に関する技術基準を定める省令
(1) 電気事業法施行規則	(12) 発電用火力設備に関する技術基準を定める省令
(2) 電気使用制限規則	(13) 発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令
(3) 電気事業法の規定に基づく主任技術者の資格等に関する省令	
(4) 受電制限規則	
(5) 電気関係報告規則	

問 5.　電気事業の特質を述べよ。

問 6.　電気事業法の趣旨を，簡単に説明せよ。

2.　電気設備技術基準

（1）　電気事業法との関連と適用範囲

電気事業法は，電気事業の規制を行うとともに，電気工作物の保安に関しても規制している。電気設備技術基準は，電気工作物による各種の障害の防止と電気工作物の機能の確保のために定められたもので，電気事業法に基づく省令の一つである。

電気事業用電気工作物のほか，自家用電気工作物および，一般用電気工作物について適用されている。したがって，電気事業用電気工作物は電気事業者が，自家用電気工作物はその設置者が，それぞれつねに電気設備技術基準どおり維持・管理しなければならない義務がある。ところが，一般用電気工作物においては，その所有者が，電気工作物を維持・管理することは困難である。そのため，一般用

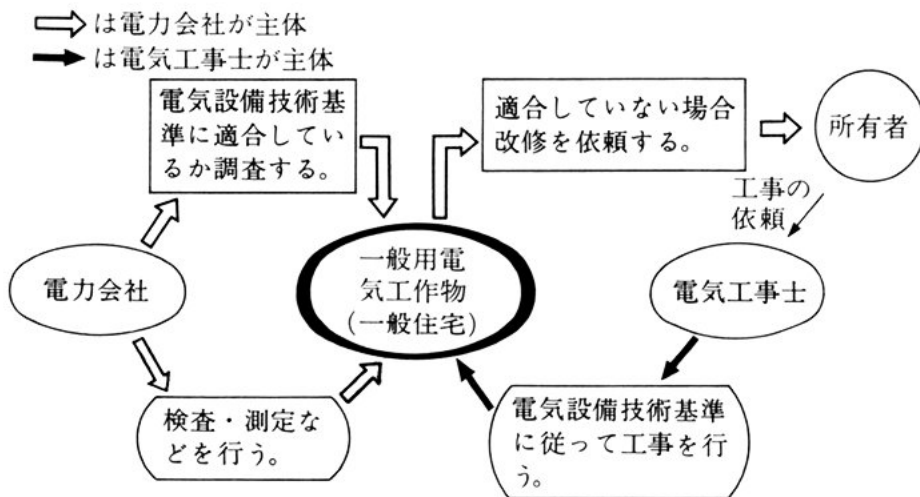



図1　一般用電気工作物の維持・管理の流れ図

電気工作物に電気を供給している業者，すなわち電力会社に，その電気工作物が，電気設備技術基準に適合しているかどうかを調査する義務を負わせている（電気事業法第67条）。

また，電気事業法第69条において，通商産業大臣が指定する者に限り，その業務を委託してもよいという規定があり，現在では，各電力会社の営業地域にある**保安協会**が，この任に当たっている。

問7.　省令とはどういうものか，例を挙げて説明せよ。

問8.　電気事業用工作物とは，どのようなものか。

（2）規制の対象

電気設備技術基準で規制できる内容は，電気事業法第48条に，次のように定められている。

1）電気工作物は，人体に危害を及ぼさないこと，また物件に損傷を与えないようにすること。

2）電気工作物は，他の電気的設備その他の物件の機能に，電気的または磁気的な障害を与えないようにすること。

3）電気事業用の電気工作物の損壊により，電気の供給にいちじ

表3　電圧の種別

種別		区　　分
低　圧	直　流	750［V］以下の電圧
	交　流	600［V］以下の電圧
高　圧	直　流	750［V］を超え，7000［V］以下の電圧
	交　流	600［V］を超え，7000［V］以下の電圧
特別高圧	直　流 交　流	7000［V］を超える電圧

（「電気設備技術基準第3条」による）

るしい支障を及ぼさないようにすること。また，自家用電気工作物に対しては，電気工作物の損壊により，電気事業者の電気の供給にいちじるしい支障を及ぼさないようにすること。

電気設備技術基準は，以上の三つの内容を中心として，電気工作物自体の具備条件および技術的条件などについて規制している。

例えば，電圧の高低によって危険度が違うので，表3に示すように，電圧を3種類に区分し，各種の電圧に適した施工方法を規定し，人体に対する危険や物損を生じないようにしている。

問 9. 表3の低圧において，直流と交流では，電圧の値が異なってる。なぜか。

（3）　電気工作物による障害防止

障害防止を施設面において考えてみると，電気工作物自体が損傷しないこと，電気工作物が人畜や他の物に障害を与えないこと，および事故の範囲を極限することの三つに分けることができる。

電気工作物自体の損傷防止の例　　電線路は，定格電圧に耐えることはもちろんのこと，想定される異常電圧にじゅうぶん耐え得るように施設されている。しかし，とくに高いサージ電圧については，避雷器を用いて阻止するよう規定している。また，短絡電流や外力

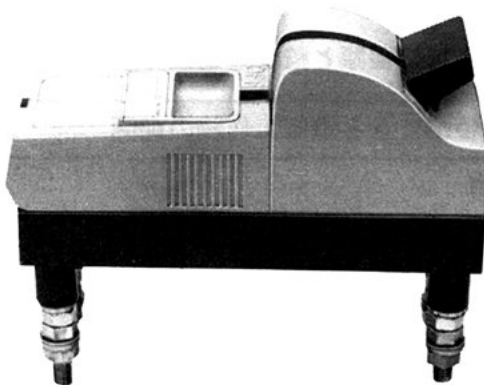
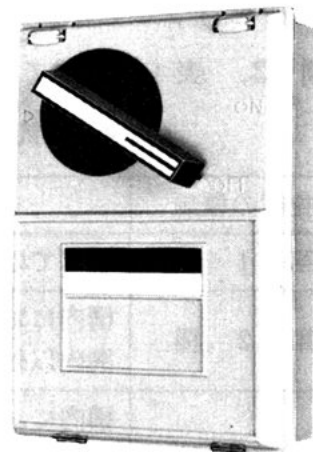
に対する損傷防止などについても触れている。このほか，塩害や化学的腐食などについても考慮されている。

人畜・他物などに与える障害防止の例　人畜に対する感電防止として，図2に示すように，人の触れるおそれがある充電部分には，絶縁を施すように規定している。また，電線路が建造物・鉄道・道路などに接近した状態で施設される場合には，相互の間隔（離隔距離）についても規制している。

事故を極限する例　あらゆる点を考えて施設面を充実しても，事故を完全に防ぐことは不可能である。したがって，事故の及ぼす範囲をできるだけ小さくすることが大切である。電気設備技術基準では，引込口には，第11章の中扉に示す分電盤の例のように，開閉器および過電流遮断器を取り付けるように規定している。また，発電機・変圧器などでは，継電器や遮断器を施設することになっている。

問 10. われわれの家庭における障害防止装置には，どのようなものがあるか調べてみよ。

問 11. 電気設備技術基準に規定されている内容を，簡単に説明せよ。

図 2　充電部分のカバー

(a)　スイッチ

(b)　配電箱

問 12. 一般用電気工作物の維持・管理は，どのように行われているか。

3. 電気主任技術者

（1） 電気主任技術者の選任とその義務

電気事業者および自家用電気工作物の設置者は，その電気工作物の工事・維持および運用に関する保安の監督のために電気主任技術者を選任し，通商産業大臣に届け出なければならない(電気事業法第53条，72条)。

選任された電気主任技術者は，電気工作物の保安責任者として，その会社や工場などの実情にあった保安規程を作成することが義務づけられている。そして，この保安規程に従って，電気工作物の工事・維持または運用を行わなければならない。

なお，電気主任技術者免状には，第1種・第2種・第3種の三つの種類がある。それぞれの免状の交付を受けた者が，電気主任技術者として，表4に示す電気工作物の工事・維持・運用に対する保安の監督を行うことができる（電気事業法施行規則第65条)。

問 13. 表4において，構内とは何か。

表 4　電気主任技術者免状の種類と監督の範囲

免状の種類	保安の監督ができる電気工作物の範囲
第　1　種	すべての電気工作物
第　2　種	構内において電圧 170000 [V] 未満の電気工作物 構内以外の場所において電圧 100000[V]未満の電気工作物
第　3　種	構内において電圧 50000 [V] 未満の電気工作物 構内以外の場所において電圧 25000 [V] 未満の電気工作物（出力 5000 [kW] 以上の発電所を除く）

（2） 電気主任技術者免状のとり方

電気主任技術者免状の取得の方法には，学歴または資格および実務の経験によって得る方法と，電気主任技術者国家試験によって得る方法とがある。

学歴または資格および実務の経験によって得る方法　次のような一定の学歴または資格と実務の経験をもつ者は，電気主任技術者免状を取得することができる。

1） 電気主任技術者免状の種類ごとに，通商産業省令で定める表5（次ページ）に示す学歴または資格および実務の経験を満たしている者。

2） 1）に該当する者と同等以上の知識および技能を有していると通商産業大臣が認めた者。

以上のいずれかに該当する者は，所定の申請書・卒業証明書・単位取得証明書・修得学科目証明書・実務経歴証明書などをそろえ，所轄（しょかつ）の通商産業局へ提出し，認定されれば免状が取得できる。

電気主任技術者国家試験によって得る方法　電気主任技術者国家試験に合格することにより，電気主任技術者免状を取得することができる。

この国家試験は，受験資格に関していっさい制限がない。したがって，試験に合格すれば，学歴や経験に関係なく電気主任技術者免状の交付を申請することによって，免状の交付が受けられる。

また，試験は年1回行われ，第1種と第2種には筆記試験と口述試験があり，第3種は筆記試験だけである。

なお，筆記試験の科目は，次に示すとおりである。

1） 電気理論，電気計測に関するもの。

2） 発電所，変電所の設計，運転に関するもの。

表 5 電気主任技術者の資格

種類	学歴	資格	実務の経験	
			実務の内容	経験年数
第1種	学校教育法による大学（短期大学を除く），もしくはこれと同等以上の教育施設または旧大学令による大学における電気工学科の卒業者	第2種電気主任技術者免状の取得者	電圧 50 [kV] 以上の実務*	（学歴による場合） 大学卒業後　5年以上 （資格による場合） 第2種取得後　8年以上
第2種	(a) 第1種の項の学歴を有する者 (b) 学校教育法による短期大学もしくは高等専門学校またはこれらと同等以上の教育施設における電気工学科卒業者	第3種電気主任技術者免状の取得者	電圧 10 [kV] 以上の実務	（学歴による場合） 大学卒業後　3年以上 短大，高専卒業後　5年以上 （資格による場合） 第3種取得後　8年以上
第3種	(a) 第2種の項の学歴を有する者 (b) 学校教育法による高等学校またはこれと同等以上の教育施設における電気工学に関する学科の卒業者		電圧 500 [V] 以上の実務	（学歴による場合） 大学卒業後　1年以上 短大，高専卒業後　2年以上 高校卒業後　3年以上

* 電気工作物の工事・維持または運用の実務のこと。

3) 送電線路，配電線路の設計，運用，屋内配線の設計に関するもの。

4) 電気機器，電気材料に関するもの。

5) 照明，電熱，電動機応用，電気化学，自動制御に関するもの。

6) 電気法規，電気施設管理に関するもの。

問 14． 第3種電気主任技術者免状取得後，6600［V］の自家用電気設備の保守業務を9年間経験した。第2種免状を取得する資格があるか。

問 15． 電気主任技術者国家試験は，どこの官庁が管轄しているか。

(3) 許可電気主任技術者

電気事業法では，自家用電気工作物の設備に対して，電気主任技術者を選任することを決めているが，中小規模の施設においては，経済的負担や人選難などから，名目的な電気主任技術者を選ぶことになり，保安業務が軽視されるおそれがある。そこで，このような欠点をなくすために，電気工作物の設置者は，電気主任技術者免状の交付を受けていない者でも，表6のような学歴または資格をもっている者の中から，通商産業大臣の許可を受けて認められた者を電

表 6 許可電気主任技術者の資格と設備の規模

設備の規模	学歴または資格
出力500［kW］未満の発電所 最大電力500［kW］未満の需要設備 電圧10［kV］未満の変電所	○工業高校電気科卒業 ○高圧電気工事技術者の資格を有する者
最大電力100［kW］未満の需要設備	○電気工事士の資格を有する者 ○短大，高専などの電気科以外の学科で，電気工学の学科目を修めて卒業した者

気主任技術者として任命することができるようになっている*。

このように特定の施設について許可され任命された電気主任技術者を**許可電気主任技術者**という。しかし，電気設備が増設された場合や，他の施設の電気主任技術者になる場合には，改めて許可を得る必要がある。

問 16. 許可電気主任技術者制度のねらいは何か。

問 17. 電気主任技術者の任務について述べよ。

問 18. 許可電気主任技術者は，どのような場合に認められているか。また，認定や試験に合格した電気主任技術者と，どんな点が異なるか。

問 19. 認定による電気主任技術者と，試験に合格した電気主任技術者では，資格のうえで違いがあるか。

4. 電気工事士法

(1) 電気工事士法の目的

電気工事士法は，電気工事の作業に従事する者の資格および義務を定めることによって，電気工事の欠陥による災害の発生の防止に寄与することを目的としている。

この法律の対象となる電気工事は，一般用電気工作物または自家用電気工作物を設置または変更する工事である。

ただし，電気工事士法における自家用電気工作物の定義は，電気事業法の定義と異なり，最大電力 500［kW］未満の自家用需要設備（低圧自家用需要設備も含む）のみをいう。

---

* 電気事業法第 72 条 2 項。

したがって，自家用発電所・変電所および500 [kW] 以上の需要設備は，自家用電気工作物から除かれており，電気工事士法の規制の対象外になっている。

(2)　電気工事士の種類と作業範囲

5　電気工事士には，第1種と第2種がある。第1種電気工事士の作業範囲は，一般用電気工作物・自家用電気工作物の電気工事である(ただし，特殊電気工事* は除く)。また，第2種電気工事士の作業範囲は，一般用電気工作物の電気工事である。

また，作業内容により，保安上支障がないと認められ，電気工事10　士の資格がなくても実施できる軽微な工事があり，また，電気工事士でなければ従事できない電気工事がある。その内容を表7，表8に示す。

表7　軽微な工事

1)　電圧600 [V] 以下で使用する差し込み接続器，ねじ込み接続器，ソケット，ローゼットその他の接続器または電圧600 [V] 以下で使用するナイフスイッチ，カットアウトスイッチ，スナップスイッチその他の開閉器にコードまたはキャブタイヤケーブルを接続する工事
2)　電圧600 [V] 以下で使用する電気機器（配線器具を除く。以下同じ）の端子に電線（コード，キャブタイヤケーブルおよびケーブルを含む。以下同じ）をねじ止めする工事
3)　電圧600 [V] 以下で使用する電力量計，電流制限器またはヒューズを取り付け，または取り外す工事
4)　電鈴，インタホン，火災感知器，豆電球その他これらに類する施設に使用する小形変圧器（二次電圧が36 [V] 以下のものに限る）の二次側の配線工事
5)　電線を支持する柱，腕木その他これらに類する工作物を設置し，または変更する工事
6)　地中電線用の暗渠(きょ)または管を設置し，または変更する工事

（「電気工事士法施行令第1条」による）

* 自家用電気工作物の電気工事のうち，ネオン工事および非常用発電装置の工事である。

表 8　電気工事士でなければ従事できない作業

1)　電線相互を接続する作業
2)　がいしに電線を取り付ける作業
3)　電線を直接造営材その他の物件（がいしを除く）に取り付ける作業
4)　電線管，線ぴ，ダクトその他これらに類する物に電線を収める作業
5)　配線器具を造営材その他の物件に固定し，またはこれに電線を接続する作業（露出形点滅器または露出形コンセントを取り換える作業を除く）
6)　電線管を曲げ，もしくはねじ切りし，または電線管相互もしくは電線管とボックスその他の付属品とを接続する作業
7)　ボックスを造営材その他の物件に取り付ける作業
8)　電線，電線管，線ぴ，ダクトその他これらに類する物が造営材を貫通する部分に防護装置を取り付ける作業
9)　金属製の電線管，線ぴ，ダクトその他これらに類する物またはこれらの付属品を，建造物のメタルラス張り，ワイヤラス張りまたは金属板張りの部分に取り付ける作業
10)　配電盤を造営材に取り付ける作業
11)　接地線を電気工作物に取り付け，接地線相互もしくは接地線と接地極とを接続し，または接地極を地面に埋設する作業
12)　電圧 600［V］を超えて使用する電気機器に電線を接続する作業

（「電気工事士法施行規則第 2 条」による）

なお，電気工事士が従事する上記の作業を補助する作業は，軽微な作業と認められているので，電気工事士の資格がない者でも実施できる。

（3）　電気工事士試験

電気工事士試験には，第 1 種および第 2 種電気工事士試験があり，それぞれ筆記試験と技能試験がある。

（a）　第 2 種電気工事士試験

この試験は，一般用電気工作物の保安上必要な知識および技能について行われる。技能試験については，筆記試験の合格者および法令の規定により筆記試験を免除された者だけが受験できる。

筆記試験の科目は，次に示すとおりである。

1）電気に関する基礎理論，2）配電理論および配線設計，3）電

気機器，配線器具ならびに電気工事用の材料，工具，4）電気工事の施工方法，5）一般用電気工作物の検査方法，6）配線図，7）一般用電気工作物の保安に関する法令

また，技能試験の科目は，次に示すとおりである。

1）電線の接続，2）配線工事，3）電気機器・器具の設置，4）電気機器・器具ならびに電気工事用の材料および工具の配線方法，5）コードおよびキャブタイヤケーブルの取り付け，6）接地工事，7）電流，電圧，電力および電気抵抗の測定，8）一般用電気工作物の検査，9）一般用電気工作物の故障箇所の修理

なお，筆記試験を免除される者は，次の者である。

1）工業高校の電気科卒業生，2）電気主任技術者の資格をもつ者，3）前回の筆記試験の合格者

(b) 第1種電気工事士試験

この試験は，一般用電気工作物および自家用電気工作物の保安上必要な知識および技能について行われる。技能試験については，筆記試験の合格者および法令の規定により筆記試験を免除された者だけが受験できる。

筆記試験の科目は，第2種電気工事士試験の筆記試験の科目に加えて，電気応用，受電設備，自家用電気工作物の検査方法，発電施設・送電施設および変電施設の基礎的な構造および特性などである。

また，技能試験の科目は，第2種電気工事士試験の技能試験の科目に加えて，蓄電池の設置，自家用電気工作物の検査・操作および故障箇所の修理などである。

なお，筆記試験を免除される者は，第1種，第2種または第3種の電気主任技術者である。

第1種電気工事士試験の合格者に与えられる資格は，次のとおり

である。

1) 通商産業大臣から認可を受けて，特定の自家用電気工作物の電気主任技術者，すなわち許可主任技術者に選任されることができる。

2) 通商産業局長から認定電気工事従事者認定証の交付を受けることにより，最大電力500 [kW] 未満の需要設備のうち，電圧600 [V] 以下で使用する自家用電気工作物に関する電気工事の作業に従事することができる。

(c) 電気工事士の免状の交付

第2種電気工事士の場合は，技能試験に合格後，都道府県知事に免状の交付を申請すれば，免状が交付される。

しかし，第1種電気工事士の場合は，技能試験に合格したのみでは免状の交付申請ができず，表9に示す付加条件が免状の取得に必要である。

表 9 第1種電気工事士免状取得の付加条件

学　歴	修　得　学　科	実務年数
大学，短大， 高等専門学校	電気理論，電気計測，製図，電気材料， 電気機器，送電，配電，電気法規など	卒業後 3年以上
その他		5年以上

(4) 高圧電気工事技術者試験

高圧電気工事技術者試験は，高圧電気工事に従事する者に対して，専門知識および技能の向上を図ることを目的として行われる試験である。

受験資格　電気工事士免状を取得している者。

試験の内容　高圧以下の電気工作物（ネオン管灯回路を含む）工事，維持および運用に関して必要な知識および技能について，表10

表 10　高圧電気工事技術者試験の内容（科目）

1．電気に関する基礎知識　　2．配電一般
3．電気機器，配電器具ならびに電気工事用の材料および工具
4．発電・送電・変電設備の概要
5．電気工事の施工方法および電気工作物の検査方法
6．配線図または結線図
7．電気工作物の保安に関する法令
電気事業法，電気用品取締法
電気工事士法，電気設備技術基準など

表 11　電気主任技術者としての設備の規模

1．① 出力 500 [kW] 未満の発電所
② 電圧 10 [kV] 未満の変電所
③ 最大電力 500 [kW] 未満の需要設備
④ 電圧 10 [kV] 未満の送電線路または配電線路を管理する事業場
2．出力 500 [kW] 未満の発電所，電圧 10 [kV] 未満の変電所もしくは送電線路，または最大電力 500 [kW] 未満の需要設備の設置の工事のための事業場

に示す科目により行われる。

合格者の資格　合格者は，通商産業大臣の許可を受けて，表 11 に示す設備または事業場の電気主任技術者（許可電気主任技術者）として選任される資格がある。

5. 電気用品取締法

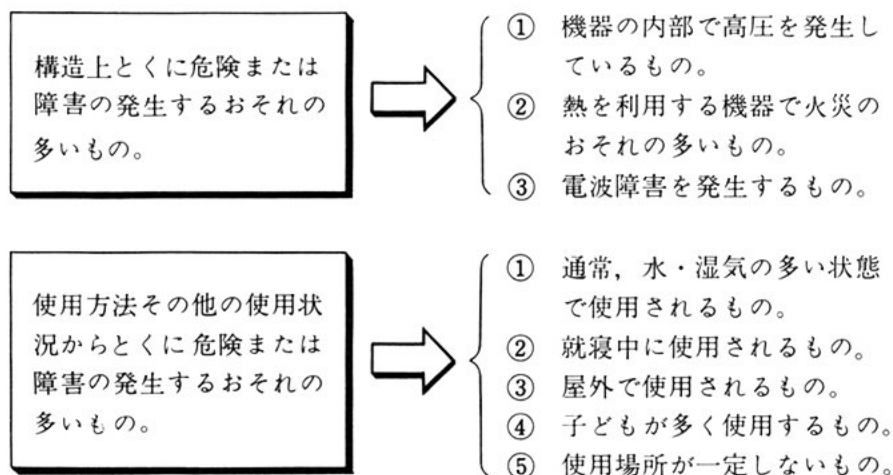
(1) この法律のねらい

この法律は，電気用品の製造・販売などを規制することにより，粗悪な電気用品による感電・火災などの危険を防止することや，ラジオ受信機などに対する雑音障害の発生を防止することを目的としている。

この法律の規制の対象となる電気用品は，主として一般用電気工作物の部分，またはこれに接続して用いられる電気機械・器具および材料であり，政令で定められている。なお，電気用品には，甲種および乙種の2段階があり，次のように定義されている。

甲種電気用品は，構造または使用方法その他の使用状況からみて，とくに危険または障害の発生するおそれが多い電気用品である。

例えば，図3に示すように，構造上から危険の発生するおそれが多い電気用品として，テレビジョン受信機など高圧を発生するものがある。また，使用方法および使用状況からみて，危険の発生する

図3　甲種電気用品に該当するもの

おそれが多いものとしては，電気洗濯機・電気毛布などがある。

乙種電気用品は，甲種電気用品以外のものをいい，卓上電子計算機・電動タイプライタなどがある。

表12は，電気用品取締法施行令に基づく対象品目の例である。

5 **問 20.** 電気洗濯機・電気毛布は，図3のどの条件によって，甲種に指定されているのか。

問 21. 電気アイロンは甲種電気用品である。その理由を説明せよ。

(2) 製造上の規制

電気用品取締法によって，国は製造しようとする電気用品の保安

10 上の基準を定め，製造業者に図4に示す義務を課し，立入検査を行って指導・監督することになっている。

表 12　甲種および乙種の対象品目の例

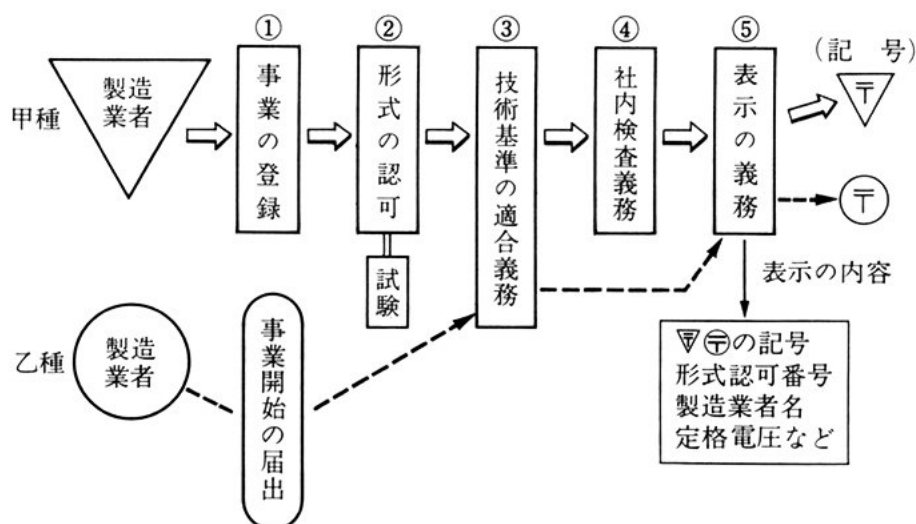
区分	対象電気用品
甲種	(1) 電線および電気温床線（絶縁電線・コードなど） (2) 電線管類および付属品ならびにケーブル配線用スイッチボックス (3) ヒューズ（糸ヒューズ・温度ヒューズなど） (4) 配線器具（点滅器・開閉器・接続器など） (5) 電流制限器 (6) 小形単相変圧器・電圧調整器および放電灯用安定器 (7) 小形交流電動機（単相電動機・かご形三相誘導電動機） (8) 電熱器具（電気毛布など） (9) 電動力応用機械器具（電気洗濯機など） (10) 光源応用機械器具（電気スタンドなど） (11) 電子応用機械器具（テレビジョン受信機など） (12) その他の交流用電気機械器具（アーク溶接機など） (13) 携帯発電機
乙種	(1) 電動力応用機械器具（電動ミシンなど） (2) 光源および光源応用機械器具（白熱電球など） (3) 電子応用機械器具（ラジオ受信機など） (4) その他の交流電気機械器具（コンセント付き家具など）

（「電気用品取締法施行令」による）

なお，甲種の電気用品を製造しようとする事業者は，図4に示すように，通商産業大臣に事業の登録をし，形式の認可を受けなければならない。

図4において，① の許可条件は，その事業所における諸設備が，通商産業省令で定める技術上の基準に適合していることである。② では，見本品について危険または障害を生じるおそれがないかを試験し，安全と認められる形式については，製造が許可される。⑤ の表示記号については，甲種では㊦の記号をつけることになっている。例えば，電線は甲種に該当しているから，㊦の記号をつけ，形式認可番号・製造業者名・定格電圧などを，電線の表面に表示することになっている。

また，乙種の電気用品を製造しようとする事業者は，通商産業大臣に事業開始の届出をし，電気用品には〒の記号，製造業者名・定格電圧・定格消費電力などを記載することになっている。

図 4　電気用品製造業者の義務

問 22. 甲種電気用品と乙種電気用品の表示記号の違いを述べよ。

問 23. 家庭にある電気製品について，どのような表示がしてあるか調べてみよ。

(3) 販売および使用の制限

電気用品取締法第27条に，次のような発売禁止に関する規定が設けられている。

「電気用品の販売業者は，形式認可済の表示のある電気用品でなければ，これを販売し，または販売の目的で陳列してはならない。」

また，第28条では，「電気事業者，自家用電気工作物の設置者および電気工事士に対し，無表示の電気用品の使用を禁示する。」という規定が設けられている。

前者は，製造や輸入の際に取り締まれなかった，違法な電気用品の流通を防止するためのものであり，後者は，電気工作物について保安上の責任を負う立場の者として，無表示の電気用品を使用してはいけないことを規定している。これらは，いずれも，違法の電気用品による火災や感電の被害から，消費者を保護し，電気知識に乏しい人々でも安心して電気用品を購入したり，使用したりすることができるようにしたものである。

問 24. 電気用品取締法における販売制限の目的は何か。また，使用制限の目的は何か。

問 25. 身のまわりにある電気用品を挙げ，甲種と乙種に分類せよ。

問　題

1. 電気事業は，広域的運営を行っているが，この方法には，どんな利点があるか。

2. 電気設備技術基準と電気工事士法および，電気用品取締法との関係について簡単に説明せよ。

3. 保安協会の任務について述べよ。

問題解答

第8章　発　　電

2 節

問 1. 4230 [kW]　**問 2.** 39200 [J], 3.96 [m/s]　**問 3.** 30200 [m^3]
問 10. 1.26×10^8 [m^3], 4 [m^3/s]　**問 11.** 190 [m^3/s]
問題 2. 4.32 [m/s], 191 [kPa]　**3.** 2.14 [h]

3 節

問 3. 1.35倍　**問 12.** 14.4 [%]
問題 3. 0.203 [kW・h/kg]　**4.** 32.5 [MW], 17.9 [%]　**5.** 38.4 [%]

第9章　送　　電

1 節

問 1. 4倍
問題 1. 0.0781　**2.** 34.6 [MW], 2.8 [MW], 37.4 [MW], 0.081
3. 2倍, 2倍　**4.** $\frac{4}{3}$　**6.** 100 [kV]

2 節

問 3. (1) 36.4 [Ω]　(2) 57.1 [Ω]　**問 5.** 47.9 [A]　**問 6.** 6.73 [kV]　**問 7.** 5.65×10^{-4} [S]　**問 8.** 30 [Ω], 102 [Ω], 7.47×10^{-4} [S]
問 9. $\dot{V}_{s1}$ の大きさは 186 [kV]，位相角は 11.8°　**問 14.** 20.1 [A]
問題 7. 64.2 [kV], 60000 [kW]　**8.** $\frac{\dot{Z}}{2}=14.7+j40.8$ [Ω], $\dot{Y}=j6\times10^{-4}$ [S], $\dot{Z}=29.4+j81.7$ [Ω], $\frac{\dot{Y}}{2}=j3\times10^{-4}$ [S]　**10.** 3.08 [km]

3 節

問 2. 6.50 [MW]
問題 1. 66 [MW]　**3.** 110 [V], 110 [V], 0 [V]

第10章　配　　電

1 節

問 7. $\frac{1}{4}$倍　**問 9.** 8.3 [kW]　**問 10.** 544 [kVA]　**問 11.** 5 [kVA]

問 12.　6.2 [kW]　**問 13**　54.2 [%]　**問 14.**　1540 [kVA]　**問 15.** 41.7 [%]

問題 3.　負荷率$=\frac{\text{平均需要電力}}{\text{設備容量（合計）}}\times\frac{\text{不等率}}{\text{需要率}}$　**4.**　1400 [kVA]　**5.**　(1) 13.3 [kW]，9.17 [kW]　(2)　$T_1=15$ [kVA]，$T_2=10$ [kVA]　(3)　17.3 [kW]　**6.**　(1)　347×10^4 [kW]　(2)　60.9 [%]　**7.**　(1)　31.3 [%]　(2) 0.77

2　節

問 1.　44.7 [V]　**問 2.**　3220 [V]，7.33 [%]　**問 3.**　110 [V]
問 4.　3200 [V]　**問 6.**　115 [W]　**問 7.**　2.83 [kVA]，0.94 [kVA]
問 9.　1.26 [kVA]　**問 10.**　60 [%]　**問 12.**　13.5 [kVA]，358 [μF]
問 14.　$S'\cos\theta$　**問 15.**　28.6 [kVA]，20 [kW]
問題 1.　6340 [V]，5.69 [%]　**2.**　BD間　89.6 [m]　**3.**　89.5 [V]
4.　4.4 [V]，3.96 [V]，20.9 [V]　**5.**　0.807　**6.**　10.7 [kVA]，237 [μF]
7.　49.9 [kVA]

第11章　屋内配線

1　節

問 2.　99 [m^2]　**問 4.**　第1種接地工事　**問 6.**　9.24 [m^2]
問題 1.　(1)　①　WH　②　PCT　③　LA　④　PL　(2)　PT：計器用変圧器　CT：変流器　F：ヒューズ　S：開閉器

2　節

問 10.　27 [A]　**問 28.**　1 [mA]

問題 1.　(1)　$\frac{1}{\sqrt{2}}$倍　(2)　86 [V]，103 [V]　(3)　78.6 [V]　**3.**　102 [A]

第12章　電気関係法規

問 14.　ない　**問 15.**　通商産業省

索　　引

く

け

こ

さ

し

と

な

に

ね

の

は

ひ

■別記著作者

林　　泉	高野雄三郎
緒方　興助	高橋　日吉
新井　芳明	高橋　亮一
海老塚佳衛	柄本　治利
鬼塚　新一	馬場秀三郎
熊谷　文宏	平井　喜之
久米　健一	藤縄　英作
菅谷　光雄	

●表紙デザイン
杉山久仁彦

平成元年3月31日　文部省検定済

電気技術ⅠB 改訂版

7	実教	工業　180

平成2年1月20日　初版印刷
平成2年1月25日　初版発行

©著作者　宮入　庄太
ほか15名(別記)

●発行者　実教出版株式会社
代表者　奥脇誠治
東京都千代田区五番町5

●印刷者　中央印刷株式会社
代表者　日岐弘登
東京都新宿区新小川町4－24

●発行所　実教出版株式会社
〒102　東京都千代田区五番町5
電話　03-238-7700(代表)
振替　東京　4-183260

●定　価　文部大臣が認可し官報で告示した定価〔消費税に相当する金額を含む〕(上記の定価は，各教科書取次供給所に表示します)